

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

USO DE ESCORIA DE COBRE EN CEMENTOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

SEBASTIÁN ANDRÉS ORIZOLA GÓMEZ

PROFESOR GUÍA:
FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
DAVID CAMPUSANO BROWN
ATILANO LAMANA POLA

SANTIAGO DE CHILE
NOVIEMBRE 2006

ÍNDICE.

ÍNDICE.....	2
Capítulo 1.....	5
INTRODUCCIÓN	
1.1. Planteamiento del problema.....	5
1.2. Objetivos del estudio.....	9
1.2.1. Objetivos Generales.....	9
1.2.2. Objetivos Específicos.....	9
Capítulo 2.....	11
ANTECEDENTES Y RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA	
2.1. Escoria de cobre.....	11
2.1.1. Aspectos generales.....	11
2.1.2. Obtención y descarte de escoria de cobre en la fundición Caletones.....	13
2.1.3. Proceso de Granallado de Escoria de Cobre.....	15
2.1.4. Investigaciones y usos a nivel mundial.....	17
2.1.5. Caracterización de escorias de cobre.....	18
2.2. Aspectos generales sobre Cementos.....	20
2.2.1. Materiales Aglomerantes inorgánicos.....	20
2.2.2. Fabricación del clínquer.....	21
2.2.3. Molienda del clínquer.....	23
2.2.4. Hidratación del cemento.....	24
2.2.5. Efectos de los componentes.....	25
2.2.6. Cementos con adiciones hidráulicas.....	26
2.3. Requisitos y Normativa Experimental.....	28
Capítulo 3.....	31
PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	
3.1. Dosificaciones de morteros.....	32
3.2. Programa de ensayos.....	33

Capítulo 4.....	34
CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	
4.1. Caracterización de la escoria de cobre.....	34
4.1.1. Molienda.....	35
4.1.2. Caracterización química.....	37
4.1.3. Caracterización mineralógica.....	38
4.2. Caracterización Cemento.....	39
4.2. Arena Normal.....	40
4.3. Agua.....	40
4.4. Aditivo.....	41
Capítulo 5.....	42
PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	
5.1. Propiedades del cemento fresco.....	42
5.2. Calor de hidratación.....	44
5.4. Resistencias Mecánicas.....	45
5.5. Resistencia al ataque de Sulfatos.....	48
5.6. Expansión en Autoclave.....	49
5.7. Lixiviación.....	51
Capítulo 6.....	52
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	
6.1. Caracterización de la escoria de Cobre.....	52
6.2. Determinación de la consistencia normal.....	52
6.3. Determinación del tiempo de fraguado.....	53
6.4. Calor de hidratación.....	54
6.5. Resistencia a la flexotracción y a la compresión.....	55
6.6. Resistencia al ataque de Sulfatos. (Norma ASTM C1012 - 04).....	56
6.7. Expansión en Autoclave.....	59
6.8. Lixiviación.....	59

Capítulo 7.....	60
CONCLUSIONES	
Bibliografía.....	63
ANEXOS	66

Capítulo 1.

INTRODUCCIÓN.

1.1. Planteamiento del problema.

Los procesos extractivos y metalúrgicos involucrados en las actividades mineras, generan una gran cantidad de residuos, los que poseen materiales minerales y principalmente escorias que son potencialmente recuperables. Actualmente existe una tendencia mundial a buscar y estudiar nuevas formas de utilización ó aprovechamiento de estos residuos, lo que se debe a diversos factores, tales como el agotamiento de zonas favorables para el depósito, el aumento de los costos de botaderos, legislaciones restrictivas en lo que a producción de residuos respecta, entre otros.

A la vez, la demanda de cemento Portland se incrementa conforme aumenta la población mundial, aumentando consecuentemente los altos requerimientos energéticos y la fuerte emisión de contaminantes asociados a la industria cementera. La producción de cemento es un proceso de alta demanda energética de combustibles (aproximadamente 4,000 kJ/kg de cemento, con 25% de pérdidas) y con alta emisión de contaminantes (0.85 – 1 kg CO₂/kg cemento) por descarbonatación de materia prima y uso de combustibles ^(Ref 1). La producción mundial de cemento es de aproximadamente 2100 millones de toneladas anuales¹, con la consecuente emisión de casi la misma cantidad de CO₂. Por esto las restricciones ambientales impuestas a las cementeras son cada vez más estrictas, lo que ha obligado a la optimización de procesos o a la búsqueda de alternativas para la resolución de los diversos problemas y necesidades actuales. En este sentido, la utilización de residuos tiene cabida como adiciones de reemplazo parcial de cemento Portland.

¹ Cifra estimada año 2004, fuente Cementos Bio Bio S.A.

Los materiales alternativos pueden ser de tipo puzolánicos, los cuales son aquellos de composición rica en SiO_2 , similares a las cenizas volcánicas utilizadas por los romanos, y por otro lado pueden ser materiales hidráulicos, entre los que se encuentran la escoria de alto horno (la más comúnmente empleada), y escorias no ferrosas, entre las que se encuentra la escoria de cobre. Pueden considerarse como materiales sintéticos dado que son subproductos y en términos generales requieren de molienda antes de ser empleados como reemplazo del cemento Portland.

Para los materiales de reemplazo de cemento Portland generalmente se requiere un estado estructural amorfo (como los vidrios), esto es, con alta energía interna y por lo tanto muy inestables termodinámicamente y muy reactivos químicamente.

Las propiedades primordiales de interés para los usuarios de materiales de construcción son la resistencia mecánica y durabilidad. Algunas ventajas que pueden explotarse del empleo de materiales cementicios sustituidos constituidos parcialmente por desechos o subproductos son los siguientes (con respecto de los materiales basados en cemento Portland):

- Propiedades mecánicas similares o en muchos casos superiores.
- Durabilidad mejorada a ambientes químicos agresivos (agua de mar, pisos en plantas químicas, etc)
- Extensión de la capacidad de producción del cemento cuando se usan como reemplazo (10 – 90%) sin requerir de procesamiento térmico adicional (ahorro de energía y menor contaminación).
- Reducción de la acumulación de desechos en botaderos o rellenos.

De esta manera se han realizado diversos estudios en el ámbito nacional e internacional para encontrar nuevos usos para los residuos provenientes de industrias como la minería y así obtener los beneficios ecológicos y económicos asociados, permitiendo alcanzar el llamado “Desarrollo Sustentable”, el cual busca la generación de bienestar para las generaciones actuales pero sin comprometer el bienestar de las generaciones venideras.

En el ámbito internacional estos residuos son utilizados como aditivos o agregados en estabilización de suelos, siendo también empleados los desechos minerales, tales como escorias, en el reemplazo de cemento Pórtland en los rellenos de minas.

Es así como se ha invertido energía en la transformación de las escorias a subproductos. De esta manera es como la vitrificación, que se logra dando un choque térmico (enfriando bruscamente) a la escoria luego del sangrado, y molienda de escorias ferrosas, tal como la escoria de alto horno, produce un material que puede ser adicionado en la elaboración de cemento Portland para la manufactura de concreto. Esta tecnología de utilización de escorias granuladas de alto horno como material aglomerante ha sido desarrollada ampliamente en Europa, Estado Unidos y Chile, dando lugar a los cementos Portland Siderúrgicos y cementos Siderúrgicos.

Por el contrario, para las escorias no ferrosas, tales como la escoria de cobre, no se ha dado el mismo desarrollo a nivel mundial, y en mucho menor grado en el ámbito nacional donde el estudio de su aplicaciones en cementos son casi nulas.

En Chile, la gran minería del cobre es la más importante actividad industrial, por lo cual produce una gran cantidad de residuos, en particular escorias derivadas de los procesos de fundición y refinación. Es por esto que existe una necesidad latente de buscar posibles aplicaciones para la escoria de cobre tanto técnica como económicamente factibles en el ámbito nacional, que permitan cambiar la situación actual de acumulación de escoria como desecho y el consiguiente impacto ambiental.

Actualmente se conocen diversas aplicaciones y usos para la escoria de cobre, en áreas tales como:

- Abrasivos.
- Elementos prefabricados de cemento.
- Aislantes térmicos.
- Materiales cerámicos y vitrocerámicos.
- Estabilizado de caminos y material de relleno.
- Cementos de construcción.

Estas aplicaciones y las mismas motivaciones planteadas anteriormente han llevado a producir diversos estudios internacionales en lo que respecta a la escoria de cobre y su uso como adición en cementos, de la misma manera que su adición en morteros de cemento en reemplazo de agregado fino. Todos estos estudios han mostrado que la escoria de cobre mantiene o mejora las propiedades mecánicas de los morteros de cemento.

Las propuestas de materiales adhesivos nuevos o de combinaciones nuevas siempre vienen acompañadas de ciertas dudas: ¿será durable el material?, ¿soportará las condiciones a la que se expondrá?, ¿mantendrá sus propiedades mecánicas y estéticas?, por esta razón la introducción de nuevos materiales de construcción no es trivial, especialmente cuando hay vidas humanas que dependen de la solidez y durabilidad de una estructura o construcción. Lo cierto es que existe una latente necesidad de alternativas de reemplazo al cemento.

El presente trabajo de título pretende estudiar el comportamiento de las principales propiedades de los morteros de cemento con adición de escoria de cobre en reemplazo de porcentaje en peso de cemento Portland. Entre las propiedades a estudiar se encuentra la cantidad de agua para obtener consistencia normal, el cambio de longitud, tiempo de fraguado, calor de hidratación, lixiviación y resistencias mecánicas.

De la misma manera se estudiará la composición química y mineralógica de la escoria de cobre, en los aspectos que puedan influir en su reactividad con los productos de la hidratación del cemento Portland.

La escoria a utilizar en el presente estudio proviene de la fundición de Caletones, de la división El Teniente de CODELCO.

1.2. Objetivos del estudio.

1.2.1. Objetivos Generales.

- Estudio de las propiedades puzolánicas de la escoria proveniente del proceso de refinación del cobre, obtenida mediante enfriamiento rápido en la fundición de Caletones, de la división El Teniente de CODELCO.
- Estudio del comportamiento de la escoria de cobre como adición en la fabricación de cementos hidráulicos en relación a la normativa chilena.
- Evaluar la factibilidad técnica de emplear la escoria de cobre como adición en cementos hidráulicos.

1.2.2. Objetivos Específicos.

- Estudio y caracterización de la escoria de cobre proveniente de la fundición de Caletones, de la división El Teniente de CODELCO, tanto del punto de vista químico como mineralógico.
- Determinación de resistencias mecánicas, como indicador de la actividad puzolánica de la escoria de cobre, a flexotracción y compresión, a distintas edades y con distintos porcentajes de adición (25% y 40% de escoria de cobre en reemplazo de cemento Portland), de probetas de mortero estándar elaborados con cementos con adiciones de escoria en distintos porcentajes (25% y 40%)
- Estudio de los efectos de las adiciones de escoria de cobre en las propiedades de morteros en estado fresco y endurecido. Particularmente la consistencia normal, el tiempo de fraguado, calor de hidratación y resistencia al ataque de sulfatos.

- Estudio de la capacidad de retención de elementos químicos contaminantes en el mortero a mediano y largo plazo mediante lixiviación.

Capítulo 2.

ANTECEDENTES Y RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA.

A continuación se expondrán los antecedentes requeridos para el desarrollo del presente trabajo, entre los que se encuentran los referidos a la escoria de cobre y las diversas aplicaciones estudiadas en el ámbito internacional para este material, antecedentes básicos sobre el cemento Portland y resúmenes de los procedimientos experimentales a realizar dados por sus respectivas normas.

2.1. Escoria de cobre.

2.1.1. Aspectos generales.

La escoria de cobre se obtiene como material de desecho a partir del proceso de refinación de dicho metal, el que se realiza a través de procesos pirometalúrgicos de minerales sulfurados de cobre, los que previos a la fusión han sido concentrados mediante el proceso de flotación.

Durante la fundición del material concentrado se producen dos fases líquidas separables o inmiscibles: la mata rica en cobre y la escoria. La mata, según su contenido de cobre, continúa luego en el proceso de refinación, mientras que la escoria fundida se descarga directamente o pasa a procesos de recuperación de cobre ^(Ref 2).

La escoria se forma a partir de los óxidos contenidos en la carga del horno y de los óxidos de hierro que se producen por la oxidación durante el procesamiento pirometalúrgico. Dependiendo de la naturaleza de los minerales, de los concentrados, de los fundentes, de las condiciones de operación y otros diversos factores, los principales óxidos que se presentan en la escoria son: ^(Ref 3)

- Óxido de hierro (como FeO, Fe₃O₄) de 30% a 40%
- Óxido de sílice (SiO₂) de 35% a 40%
- Óxido de aluminio (Al₂O₃) hasta 10%
- Óxido de calcio (CaO) hasta 10%

Específicamente, la escoria proveniente de la fundición Caletones, que es la que se utilizó en el presente estudio, posee según estudios realizados con anterioridad las siguientes características: (Ref 10)

- Constituyentes predominantes: Sílice, Aluminio, Fierro.
- Otros constituyentes en Silicatos: Calcio.
- Metales ocasionales: No tiene.
- Compuestos de cobre detectados: Eje, Sulfuros, Cobre Metálico.
- Otros elementos del eje: Fierro, Azufre, Arsénico.

Y de la misma manera, la escoria de Cobre contiene los siguientes compuestos de manera predominante:

Tabla I. Compuestos predominantes escoria de cobre Fundición Caletones.

Componente	Porcentaje (%)
Cobre (Cu)	0,86
Magnetita (Fe ₃ O ₄)	6,6
Fierro (Fe)	42,6
Sílice (SiO ₂)	32,7
Alumina (Al ₂ O ₃)	6,6
Otros	10,64

En la fundición de Caletones se cuenta con una planta de granalla de escoria de cobre, en la cual se obtiene Escoria granallada, la que es el producto de enfriar bruscamente la escoria fundida luego del sangrado, con lo cual el efecto de choque térmico produce una estructura vitrificada altamente amorfa, y en forma de granos de tamaños inferiores a 1 cm de diámetro.

2.1.2. Obtención y descarte de escoria de cobre en la fundición Caletones. (Ref 4)

Para el caso particular de la fundición de Caletones, el proceso de generación de escoria se aprecia gráficamente en la Figura 2. El mineral obtenido en la mina El Teniente, es chancado y molido para ser concentrado mediante flotación en el concentrador Colón. El concentrado así obtenido es filtrado y secado resultando con un 8% de humedad. Luego, el concentrado pasa al horno de reverbero, el cual produce mata (sulfuro de cobre y fierro) con un contenido de cobre de 50% y, como subproducto, escoria de cobre que va a botadero. El eje o mata se vacía por el fondo del horno de reverbero y se transporta a los hornos convertidores para continuar su procesamiento pirometalúrgico.

Como producto del convertidor Teniente se obtiene metal blanco, que posee un 75% de cobre, el que alimenta al convertidor convencional y, como residuo, se obtiene escoria de convertidor que recircula al horno de reverbero o al horno de limpieza de escoria, ya que posee un alto contenido de cobre (aproximadamente un 8%).

Del horno de limpieza de escoria se obtiene una mata enriquecida con un 70% en cobre, el cual recircula al convertidor Teniente y, como residuo, se obtiene una escoria que posee un 0.8% de cobre, la que va a botadero.

Del convertidor convencional se obtiene como producto final cobre blíster, con una pureza de 99.4% de cobre, el que pasa a un horno de retención, y luego a ruedas de moldeo donde toma la forma de barras, o bien, pasa a refinación en hornos de refinado a fuego (hornos de ánodos).

El descarte de escorias a botadero se realiza por dos vías: ferrocarril para el caso de las escorias de horno de reverbero, o mediante camión, para las escorias del horno de limpieza.

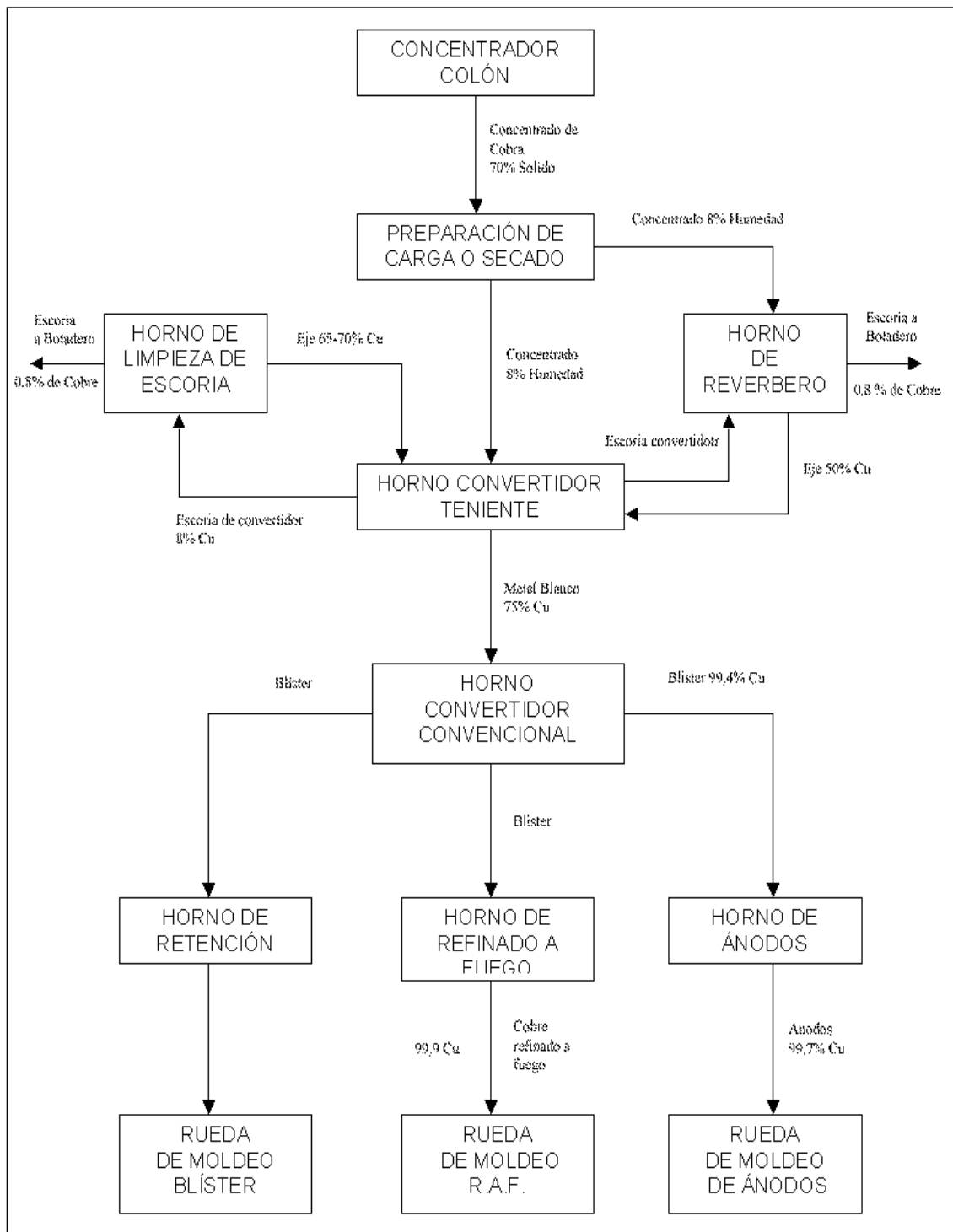


Ilustración 1. Proceso de generación de escoria de cobre en fundición Caletones (Ref 4).

2.1.3. Proceso de Granallado de Escoria de Cobre. (Ref 4)

El proceso utilizado en la fundición Caletones para la obtención de escoria de cobre granallada es la Granulación de escorias de cobre. Este proceso consiste en la verter la escoria fundida en un pozo de granulación o granallador, el que mantiene una cantidad de agua constante que se renueva de acuerdo a la granulación que se realice, dentro del cual se produce el enfriamiento brusco (casi instantáneo) de la escoria, la que pasa de una temperatura de aproximadamente 1150 °C a menos de 100 °C. Esto provoca que la escoria pase de un estado fundido a un estado de granos sólidos. En este proceso no se producen modificaciones químicas o reacciones químicas que alteren la composición de la escoria, sino que ocurren cambios mecánicos y físicos al cambiar de estado fundente a granos sólidos.

Una vez producida la granulación de escoria, se forma una suspensión agua – escoria granulada la que es llevada a un sistema de separación sólido – líquido. El agua obtenida de esta separación posee una temperatura mayor a su temperatura en condiciones normales, por lo que debe ser enviada a torres de enfriamiento, donde una vez tratada, el agua es reciclada al granallador. La escoria granulada obtenida con una humedad de 10 – 12% aproximadamente, es llevada a una cancha de acopio.

Luego, la escoria granulada pasa a una etapa de clasificación donde mediante mallas se desechan los granos que no corresponden a la granulometría especificada para granos abrasivos (que es el único uso actual de la escoria de cobre de la fundición Caletones). Los granos desechados van a botadero y los granos útiles van a una cancha de acopio, donde son almacenados.

El proceso descrito, se puede apreciar de manera gráfica en la figura 2.

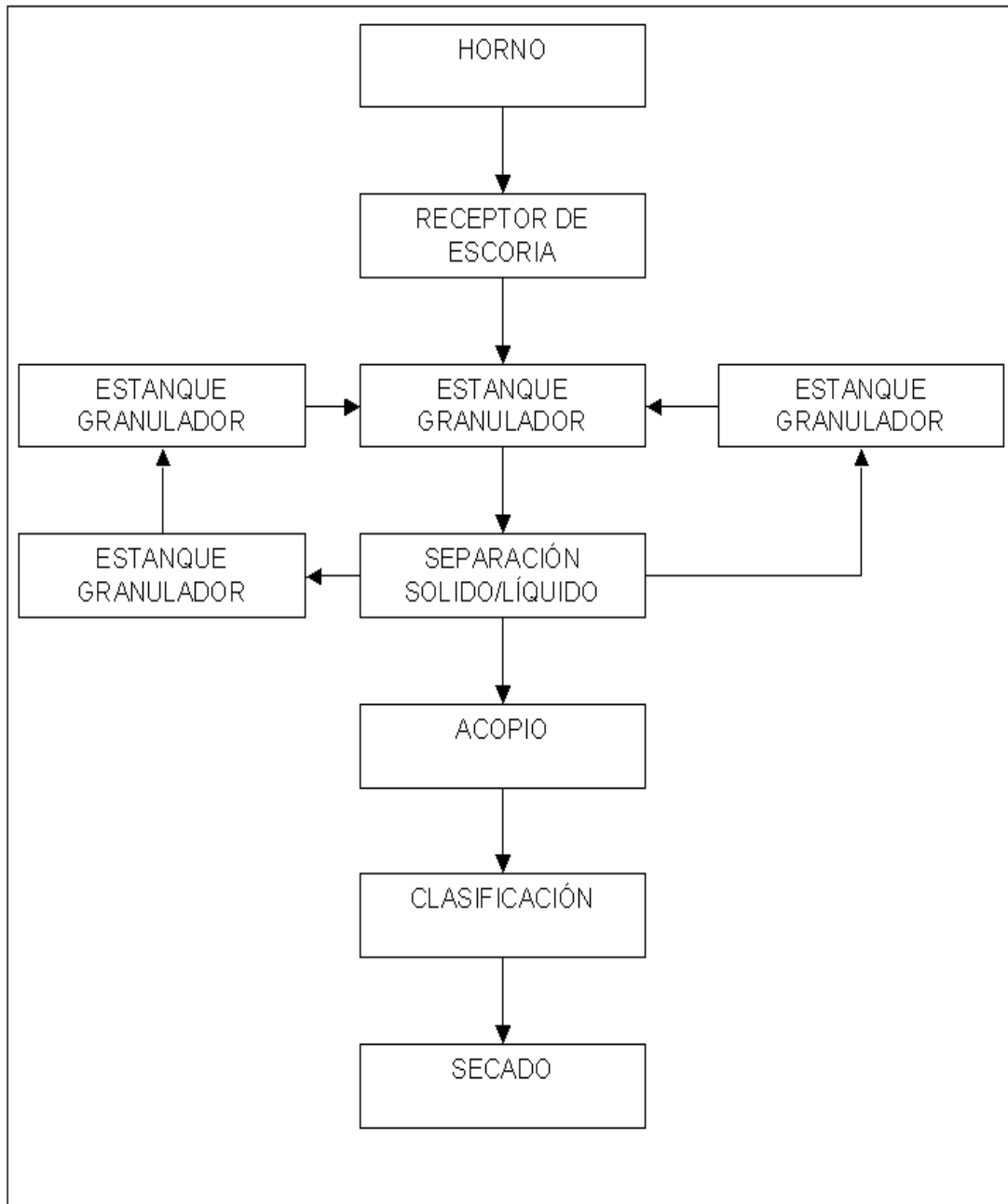


Ilustración 2. Proceso de granallado de escoria de cobre en la fundición Caletones (Ref 4).

2.1.4. Investigaciones y usos a nivel mundial.

Durante la década de los 70 las escorias de cobre comenzaron a ser utilizadas en Europa y Australia reemplazando parcialmente el cemento Pórtland en rellenos cementicios para el saneamiento de minas subterráneas abandonadas. Un estudio realizado a comienzos de los ochenta se centra en analizar el calor de hidratación de mezclas de escoria con cal en distintos porcentajes. Los resultados plantean la necesidad de que la escoria debe estar en estado vítreo para que ocurra la hidratación^(Ref 5).

A mediados de los ochenta, aproximadamente un 45% de las escorias de cobre eran utilizadas en Canadá como agregados en construcciones básicas y rellenos de ingeniería, siendo el resto descartado en botaderos. Luego del éxito alcanzado principalmente en Australia en rellenos de minas, nació el interés por estudiar en profundidad esta aplicación, con el fin de bajar los costos de las operaciones mineras y los de transporte de cemento hacia áreas de fundición remotas, así como disminuir las áreas de botadero y su consecuente impacto ambiental. De esta manera se ha obtenido empíricamente a través de dichas investigaciones una directa relación entre el grado de finura y el contenido vítreo con respecto a la actividad puzolánica y el desarrollo de resistencia mecánica ^(Ref 6).

Un estudio más profundo se llevó a cabo en dicha década ^(Ref 7), analizando mezclas de cemento Portland-escoria de cobre en 35% y 70% en peso, el cual mostró entre sus resultados la confirmación de la información respecto del aumento de la resistencia mecánica según el grado de molienda de la escoria, y a la presencia de fase vítrea.

Los diversos estudios realizados y las patentes que se han desarrollado a partir de estos han desembocado en la inclusión de la Norma Europea Experimental, aprobada por el Comité Europeo de Normalización en 1992, de los cementos elaborados con escoria de cobre como adición en cemento Pórtland, limitando su incorporación hasta un 15% en peso. En esta norma se considera este material como una puzolana industrial ^(Ref 8).

Por otro lado, también se han hecho estudios respecto a las propiedades de cementos utilizando escoria de cobre como sustituto de agregado fino, en las que se observa un aumento en la resistencia para reemplazos de hasta un 80% de arena, constituyendo una aplicación de menor costo de producción debido a no involucrar los altos gastos de molienda que hay que considerar al trabajar la escoria como adición hidratante en cemento Portland (Ref 9).

En el ámbito nacional se tiene referencia de un solo estudio realizado en cuanto a la factibilidad técnica de utilizar escoria de cobre como reemplazo de cemento Portland y de agregado fino, el cual tuvo como resultado la comprobación de lo estudiado internacionalmente y presentado en los párrafos anteriores, además se comprobó que los morteros con adición de puzolana en reemplazo de cemento Portland (10%, 20% y 30%) cumplen los tiempos mínimos de fraguado establecidos por la normativa nacional, al igual que las resistencias mecánicas y los índices de actividad puzolánica. De la misma manera comprobó que la escoria granallada como agregado fino (en reemplazo de 25% y 50%) mantiene las resistencias mecánicas de los morteros con arena normalizada. Así se concluyó que la para este nivel de estudio es totalmente factible la utilización de la escoria de cobre en cementos ya sea como reemplazo al cemento Portland ó agregado fino, viendo una buena proyección a futuro para este material en el área de la construcción (Ref 10).

2.1.5. Caracterización de escorias de cobre.

Las escorias que han sido estudiadas a escala internacional para ser utilizadas en aplicaciones industriales, abarcan un amplio espectro de características de acuerdo a su origen. Las diferencias en el contenido vítreo, dureza en la molienda y actividad puzolánica son factores relevantes a considerar al determinar la factibilidad técnica de su utilización. Estas características dependen directamente de las composiciones químicas que se presentan en las escorias, producto del origen mineral del material, así como de los procesos de producción empleados en las fundiciones.

De acuerdo a los datos publicados en numerosas publicaciones, el contenido de fase vítrea de las escorias de cobre depende de la velocidad de enfriamiento de ésta

luego del sangrado. De esta forma, el contenido de vidrio medido principalmente con difracción de rayos X, puede ir desde 75% a 95% para las escorias enfriadas bruscamente, es decir a través de un choque térmico; mientras que en las enfriadas lentamente, éste puede disminuir hasta un 45% (Ref 11).

Con respecto a la molienda de la escoria de cobre, se ha comprobado que los consumos de energía necesarios son mayores que los requeridos para moler clínquer de cemento o escoria de alto horno. De la misma manera, se debe aumentar la energía utilizada para moler las escorias con mayor grado de vitrificación.

Por otro lado, se ha establecido que existiría una directa relación entre el grado de finura de la escoria y el desarrollo de resistencias en muestras de cemento con adición, obteniéndose mejores resultados para escorias enfriadas bruscamente.

2.2. Aspectos generales sobre Cementos.

2.2.1. Materiales Aglomerantes inorgánicos.

Los materiales aglomerantes comprenden la variedad de productos cerámicos que pueden mezclarse con agua para formar una pasta. La pasta, que es plástica temporalmente, se puede moldear y puede o no tener agregados incluidos en ella. Más tarde, se endurece o fragua como resultados de reacciones químicas en una masa compacta. (Ref 12)

Los cementos hidráulicos más complejos adquieren sus propiedades aglomerantes de la formación de nuevos compuestos químicos durante el proceso de fabricación. El término hidráulico aplicado a los cementos, significa que es capaz de desarrollar resistencia mecánica y endurecerse en presencia de agua.

Según la norma chilena NCh 148 (Ref 13), el cemento es un material pulverizado que por adición de agua forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo el agua como en el aire. El tipo de cemento más importante es el cemento Portland, no sólo por ocupar el primer lugar en la producción mundial, sino también por ser la base de fabricación de los otros conglomerantes llamados cementos con adiciones (puzolánicos, siderúrgicos, con cenizas volantes, etc).

La fabricación del cemento Portland se realiza a partir del clínquer correspondiente, producto constituido principalmente por silicatos de calcio. El clínquer de cemento Portland se obtiene por calentamiento hasta una temperatura inferior a la temperatura de fusión incipiente, de una mezcla homogénea de materias primas finamente molida, formada principalmente por óxidos de calcio (CaO) y silicio (SiO₂), y por óxidos de aluminio (Al₂O₃) y hierro (Fe₂O₃) en menor medida. En la fabricación del cemento se distinguen dos etapas: producción del clínquer y molienda del cemento. (Ref 12)

2.2.2. Fabricación del clínquer.

Las materias primas para la fabricación del clínquer antes mencionadas, se obtienen de materiales calcáreos (caliza), arcillas y correctores de dosificación, las que deben ser agregadas al proceso en proporciones adecuadas de acuerdo al contenido que tengan cada uno de los óxidos requeridos. Dependiendo de su naturaleza y de las condiciones en las que llegan a la planta pueden sufrir uno o varios tratamientos primarios: cribado o harneado, reducción de tamaño, prehomogeneización y secado. Esto se hace con el fin de optimizar el rendimiento de los molinos de la etapa posterior.^(Ref 12)

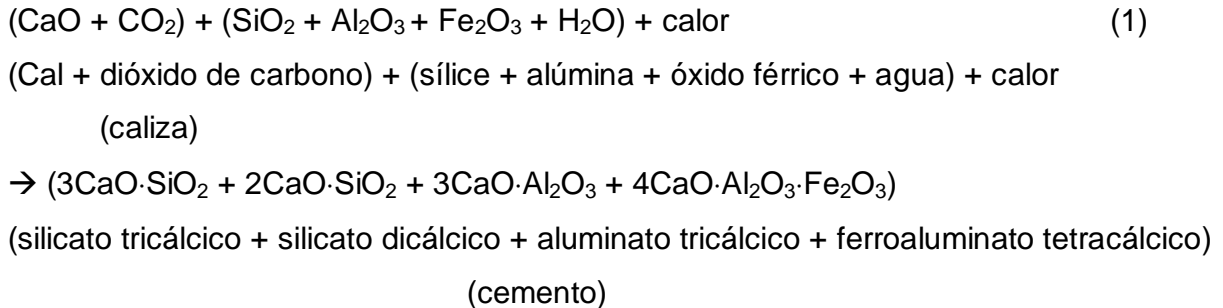
La molienda de las materias primas tiene por objeto reducirlas de tamaño a un estado pulvurento, para que puedan reaccionar químicamente durante la clínquerización, al mismo tiempo de obtener el mezclado de los distintos materiales. Los molinos comúnmente utilizados son de bolas, barras o pendulares, obteniéndose un polvo fino de tamaño inferior a 100 micrones. En ocasiones se inyecta aire caliente al molino para secar las materias primas.

Posteriormente, se realiza la homogenización de los materiales con el fin de asegurar la calidad del clínquer, así como para corregir las dosificaciones y mantener una adecuada operación en el horno. Esto se puede realizar en silos, donde el crudo se agita mediante la inyección de aire comprimido, lo que a su vez permite almacenar material para mantener en operación el horno, pese a la detención de los molinos, evitando así el deterioro de este por eventuales detenciones.

La clínquerización constituye la etapa más importante del proceso. Los materiales homogenizados se calientan hasta llegar a la temperatura de fusión incipiente, para que se produzcan las reacciones químicas que dan lugar a la formación de los principales compuestos mineralógicos del clínquer:

- Silicato tricálcico (C₃S)
- Silicato bicálcico (C₂S)
- Aluminato tricálcico (C₃A)
- Ferroaluminato tetracálcico (C₃AF)

Las reacciones se ilustran en la ecuación (1), en donde se muestran los cuatro componentes principales del cemento, en forma de productos de reacción (Ref 14).



Cada uno de estos compuestos, que constituyen más del 90% del peso de cemento, los cuales son silicato tricálcico (C₃S), silicato dicálcico (C₂S), aluminato tricálcico (C₃A) y ferroaluminato tetracálcico (C₄AF), puede identificarse en la estructura del clínquer, aportando cada uno propiedades características que determinan la mezcla final.

La temperatura de rotación fluctúa entre 1.400°C y 1.500°C, utilizando para ello hornos rotatorios, con inclinaciones de 3% a 5%. Su diámetro y longitud dependen de la capacidad de producción para la cual fueron diseñados, pudiendo tener largos de 60 a 200 metros y diámetros de 2 a 6 metros.

El material crudo se alimenta por la parte superior en contracorriente con los gases del horno y, gracias al movimiento e inclinación del mismo, se va desplazando hacia la sección de mayor temperatura hasta llegar a la zona de la llama, donde se produce la clinquerización.

A medida que el crudo avanza por el horno sufre diversas transformaciones:

- 1- Secado del agua libre.
- 2- Deshidratación o pérdida del agua combinada.
- 3- Disociación del carbono de calcio en la cal (CaO) y anhídrido carbónico.
- 4- Clinquerización o combinación de los diferentes óxidos para formar silicatos, aluminatos y ferroaluminatos de cal.

Al salir del horno, el clínquer debe enfriarse rápidamente para evitar la descomposición del silicato, debiendo salir del sistema de enfriamiento con una temperatura inferior a 150°C.

2.2.3. Molienda del clínquer.

La etapa posterior la constituye la molienda del clínquer, yeso y otros componentes para formar el cemento Portland, lo que consiste en reducir dichos materiales a un polvo fino de tamaño inferior a 150 micrones en molinos de bolas. Luego, el producto es almacenado en silos de hormigón, los que cuentan con equipos auxiliares adecuados para mantener el cemento en agitación y así evitar la segregación por decantación de los granos gruesos o la aglomeración, pudiendo mantener de esta forma el cemento almacenado por varios meses.

Finalmente, el cemento es envasado en bolsas de papel para su comercialización, o es transportado a granel a los puntos de distribución.

Los componentes que se adicionan al clínquer durante la molienda pueden ser puzolanas (naturales o artificiales) o escoria de alto horno, los que se añaden para reducir costos de fabricación de material, aprovechando las propiedades puzolánicas de estos materiales. A partir de estos se fabrican los cementos comerciales en Chile como puzolánicos y siderúrgicos.

2.2.4. Hidratación del cemento. (Ref 12)

Cuando se agrega agua al cemento Portland, los compuestos básicos presentes en la ecuación (1) se transforman en nuevos compuestos por reacciones químicas (2).

Silicato tricálcico + agua → gel de tobermorita + hidróxido de calcio (2)

Silicato dicálcico + agua → gel de tobermorita + hidróxido de calcio

Ferroaluminato tetracálcico + agua + hidróxido de calcio → hidrato de calcio

Aluminato tricálcico + agua + hidróxido de calcio → hidrato de aluminato tricálcico

Aluminato tricálcico + agua + yeso → sulfoaluminatos de calcio

Los silicatos de calcio dicálcico y tricálcico, que constituyen alrededor del 75% del peso de cemento Portland, reaccionan con el agua para producir dos nuevos compuestos: gel de tobermorita (C-S-H) el cual es no cristalino e hidróxido de calcio que es cristalino. En la pasta de cemento completamente hidratada, el hidróxido de calcio constituye el 25% en peso y el gel de tobermorita, alrededor del 50%. La tercera y cuarta reacciones en la ecuación (2) muestran como se combinan los otros dos compuestos principales del cemento Portland con el agua para formar productos de reacción. En la última reacción aparece el yeso, compuesto agregado al clínker durante la molienda para controlar el fraguado.

Cada producto de las reacciones de hidratación posee propiedades características en cuanto al comportamiento mecánico de la pasta endurecida. El más importante de ellos es el compuesto llamado gel de tobermorita, el cual es el principal compuesto aglomerante de la pasta de cemento. Este gel tiene composición y estructura semejantes a la de un mineral natural, llamado tobermorita, debido a que fue descubierto en la zona de Tobermory en Escocia. Este gel es una sustancia coloidal, extremadamente fina, con estructura coherente. La enorme superficie específica del gel (alrededor de 3.000.000 de cm^2 por gramo) produce fuerzas atractivas entre las partículas, porque los átomos en cada superficie tratan de completar sus enlaces no saturados por medio de absorción. Estas fuerzas ocasionan que las partículas de gel tobermorita se adhieran entre si y con otras partículas introducidas en la pasta de

cemento. Por tanto, el gel de tobermorita forma la base de la pasta de cemento endurecida y del concreto, porque liga o aglutina entre sí a todos los componentes.

2.2.5. Comportamiento de las fases componentes. (Ref 12)

Cada uno de los cuatro compuestos principales del cemento Portland contribuye en el comportamiento del mismo, cuando pasa del estado plástico al endurecido durante el proceso de hidratación. El conocimiento del comportamiento de cada uno de los compuestos principales durante la hidratación permite ajustar las cantidades de cada uno durante la fabricación, para producir las propiedades deseadas en el cemento.

- Silicato tricálcico (C_3S): es el que produce el desarrollo de resistencia del cemento Portland hidratado en las primeras semanas. Pasa del fraguado inicial al final en unas cuantas horas. La reacción del C_3S con agua, al igual que la de los otros compuestos es exotérmica, desprende una gran cantidad de calor llamado calor de hidratación. La rapidez del endurecimiento de la pasta de cemento está en relación directa con el calor de hidratación, cuanto más rápido sea el fraguado, tanto mayor será la exotermia. El C_3S hidratado alcanza gran cantidad de su resistencia en siete días.
- Silicato dicálcico (C_2S): se encuentra en tres formas diferentes designadas alfa, beta y gama. Dado que la fase alfa es inestable a la temperatura ambiente y la fase gama no muestra endurecimiento al hidratarla, sólo la fase beta es importante en el cemento Portland. El C_2S beta requiere algunos días para fraguar. Es el causante principal de la resistencia posterior a de la pasta de cemento Portland. Debido a que la reacción de hidratación avanza con lentitud, hay un bajo calor de hidratación. El compuesto C_2S beta en el cemento Portland desarrolla menores resistencias que el C_3S en las primeras edades, sin embargo, aumenta gradualmente, alcanzando a unos tres meses una resistencia similar a la del C_3S .

- Aluminato tricálcico (C_3A): presenta fraguado instantáneo al hidratarse. Es el causante primario del fraguado inicial del cemento Portland y desprende grandes cantidades de calor durante la hidratación. El yeso agregado al cemento Portland durante la molienda en el proceso de fabricación, se combina con el C_3A para controlar el tiempo de fraguado. El compuesto C_3A muestra poco aumento en la resistencia después de un día. Aunque el C_3A hidratado, por sí solo, produce una resistencia muy baja, su presencia en el cemento Portland hidratado produce otros efectos importantes. Un aumento en la cantidad de C_3A en el cemento Portland ocasiona un fraguado más rápido y, también disminuye la resistencia del producto final al ataque por sulfatos.

- Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF): es semejante al C_3A , porque se hidrata con rapidez y sólo desarrolla baja resistencia. No obstante, al contrario del C_3A , no interfiere en el proceso de fraguado.

La rapidez de hidratación es afectada, además de la composición, por la finura de la molienda, la cantidad de agua agregada y las temperaturas de los componentes al momento de mezclarlos. Para lograr una hidratación más rápida, los cementos se llevan a altos niveles de finura ($> 5000 \text{ cm}^2/\text{g}$) hasta dejarlos muy finos. El aumento de la temperatura de curado y la presencia de una cantidad suficiente de agua contribuyen a la rapidez de la reacción.

2.2.6. Cementos con adiciones hidráulicas.

Los cementos con adiciones puzolánicas producidos en Chile se clasifican en la norma chilena NCh 148 Of68 de acuerdo a la cantidad de adición en peso respecto al cemento Pórtland:

- Cemento Pórtland puzolánico (hasta 30% de puzolana).
- Cemento puzolánico (entre 15% y 50% de puzolana).
- Cemento Pórtland siderúrgico (hasta 30% de escoria de alto horno).
- Cemento siderúrgico (entre 30% y 75% de escoria de alto horno).

Los cementos puzolánicos son el producto de la molienda conjunta de clínquer, puzolana y yeso. Se llama puzolana al material sílico-aluminoso que, aunque no posee propiedades aglomerantes por sí solo, las desarrolla cuando está finamente dividido y en presencia de agua, por reacción química con el hidróxido a temperatura ambiente. Las puzolanas aprovechan para endurecer el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) generado por el clínquer durante el curso de su hidratación. La cantidad de puzolana en un cemento está limitada a un 50% del producto terminado, ya que para cantidades mayores no existiría suficiente hidróxido de calcio para reaccionar con el exceso de adición.

Los cementos siderúrgicos son producto de la molienda del clínquer de cemento Portland, escoria básica de alto horno y yeso. La escoria básica de alto horno “es el producto que se obtiene en el proceso metalúrgico como una masa no metálica que resulta en el tratamiento del mineral de hierro en un alto horno”. Este material tiene como constituyentes principales silicatos y sílico- aluminatos de calcio.

La tendencia mundial, actualmente, es la de fabricar cementos con adiciones cuando éstas están disponibles, por razones de orden económico, ecológico y técnico. Los cementos con adiciones han mostrado tener muchas cualidades ventajosas respecto a los cementos Portland, como por ejemplo: menor calor de hidratación, mayor resistencia química, y en consecuencia, mayor durabilidad, y altas resistencias mecánicas a largo plazo.

La principal diferencia entre las escorias de alto horno y las no ferrosas, entre las que se encuentra la escoria de cobre, es el contenido de CaO , el cual es mucho mayor en las escorias siderúrgicas, lo que explica la diferenciación en las propiedades cementicias de ambos materiales, ya que, tal como se mencionó anteriormente, la escoria de alto horno posee propiedades aglomerantes por sí sola, mientras que la escoria de cobre, no posee tales propiedades o son poco significativas.

2.3. Requisitos y Normativa de Ensayos.

Para un buen desarrollo del trabajo experimental, y por sobre todo, para contar con datos experimentales confiables y comparables con los que entrega el control de calidad, cada uno de los ensayos realizados se basó en la norma correspondiente que lo rige, ya sea esta Norma Chilena NCh ó Norma ASTM. Cada una de las normas de ensayo utilizadas contaba con la implementación de laboratorio adecuada en la sección de Aglomerantes de IDIEM, laboratorio en el cual se llevó a cabo la mayor cantidad de los ensayos cuyos resultados se muestran en el presente trabajo.

A continuación se presenta un resumen de los ensayos a realizar para evaluar el comportamiento de morteros con cementos experimentales con sus respectivas normas y requisitos generales exigidos por la misma.

- Los requisitos químicos para los cementos se establecen en la norma NCh 148 Of68. (Ref 16)

Tabla II. Requisitos químicos para los cementos.

	Cemento Portland	Cementos siderúrgicos		Cementos puzolánicos		Cementos con agregado tipo A	
		Portland siderúrgico	siderúrgico	Portland puzolánico	puzolánico	Portland con agregado tipo A	Con agregado tipo A
Pérdida por calcinación máx(%)	3,0	5,0	5,0	4,0	5,0	7,0	9,0
Residuo Insoluble máx(%)	1,5	3,0	4,0	30,0	50,0	21,0	35,0
Contenido de SO ₃ máx(%)	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Contenido de MgO máx(%)	5,0	-	-	-	-	-	-

- Para el ensayo de la determinación de la consistencia normal se utilizó la norma NCh 151. Of68 – Cemento – Método de determinación de la consistencia normal. (Ref 17)

- Para el ensayo de la determinación del tiempo de fraguado se utilizó la norma NCh 152. Of71 – Cemento – Método de determinación del tiempo de fraguado. (Ref 18) En esta se establecen los tiempos de fraguado inicial mínimo y tiempo de fraguado final máximo para los cementos corrientes y de alta resistencia, cuyos valores se muestran a continuación.

Tabla III. Requisitos de tiempos de fraguado.

Grado	Tiempo de fraguado	
	Inicial mínimo (min)	Final máximo (h)
Corriente	60	12
Alta resistencia	45	10

- Para el ensayo de la determinación del calor de hidratación se utilizó la norma ASTM C 186-05 – Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement. (Ref19)

- Para los ensayos de determinación de resistencias mecánicas se utilizó la norma NCh 158. Of67 – Cementos – Ensayos de flexión y compresión de morteros de cemento (Ref 20). En esta norma se establecen las resistencias mínimas a compresión y resistencias mínimas a flexión, a edades de 7 y 28 días, para los cementos corrientes y de alta resistencia, cuyos valores se muestran a continuación.

Tabla IV. Requisitos de resistencias mínimas.

Grado	Resistencia mínima a la compresión		Resistencia mínima a la flexión	
	7 días kg/cm ²	28 días kg/cm ²	7 días kg/cm ²	28 días kg/cm ²
Corriente	180	250	35	45
Alta resistencia	250	350	45	55

- Para la determinación de la deformación debida a exposición a solución sulfatada se utilizó la norma ASTM C 1012 – Standard Test Method for Length Change of Hydraulic Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution (Ref 24).

Capítulo 3.

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.

En el presente estudio se trabajará con cementos experimentales formados por un cemento Portland y escoria de cobre dosificada en distintas proporciones, con los cuales se fabricarán morteros normales que serán sometidos a los distintos ensayos antes descritos. El plan de trabajo a seguir considera una serie de ensayos, los cuales se planificaron atendiendo a los requerimientos de tiempo necesario para cada uno. En una primera etapa se caracterizarán los materiales a utilizar, luego la escoria de cobre se someterá a molienda y posteriormente a ensayos con el fin de conocer su composición química y mineralógica, al mismo tiempo que el cemento base se someterá a ensayos para conocer algunas de sus propiedades químicas de interés para el presente estudio. Posteriormente se procederá a la fabricación de los cementos experimentales mediante la mezcla de ambos componentes (cemento Portland y escoria de cobre) en la dosificación adecuada, las cuales corresponderán a mezclas de cemento / escoria de cobre a razón de 25% y 40% de escoria con respecto al peso del cemento Portland. Luego, según el programa de ensayos se procederá con la fabricación de las probetas correspondientes a los ensayos de mayor duración, de esta manera se llevaron a cabo los siguientes ensayos: resistencias mecánicas, resistencia al ataque de sulfatos, expansión en autoclave, calor de hidratación, consistencia normal, tiempos de fraguado y lixiviación.

3.1. Preparación de los cementos a estudiar.**Tabla V.** Dosificaciones de cementos experimentales.

Nomenclatura	Cemento (%)	Escoria de cobre (%)
Patrón	100	0
P25	75	25
P40	60	40

Una vez realizadas las mezclas cemento Portland / escoria de cobre, se procedió a su homogenización en un equipo mecánico dispuesto en la sección aglomerantes de IDIEM con el objetivo de obtener los cementos experimentales a utilizar en el presente estudio.

3.2. Programa de ensayos.

Para el presente estudio experimental, se fabricaron probetas de mortero conforme a los requerimientos de las normas correspondientes, y con la dosificación que establece la norma chilena NCh 148.

De esta manera, se realizó el siguiente programa experimental de ensayos para el estudio de los cementos con adición de escoria de cobre.

Tabla VI. Programa de ensayos.

Serie	Ensayo						
	Resistencia Mecánica	Expansión Sulfatos	Consistencia Normal	Tiempo fraguado	Calor Hidratación	Expansión Autoclave	Lixiviación
Patrón	X	X	X	X	X	X	
P25	X		X	X	X		
P40	X	X	X	X	X	X	X
P40A	X						

Serie Patrón: Mortero normal (cemento Portland) / (arena).

Serie P25: Mortero normal (cemento Portland y escoria de cobre en un 25% en peso de cemento) / (arena).

Serie P25: Mortero normal (cemento Portland y escoria de cobre en un 40% en peso de cemento) / (arena).

Capítulo 4.

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.

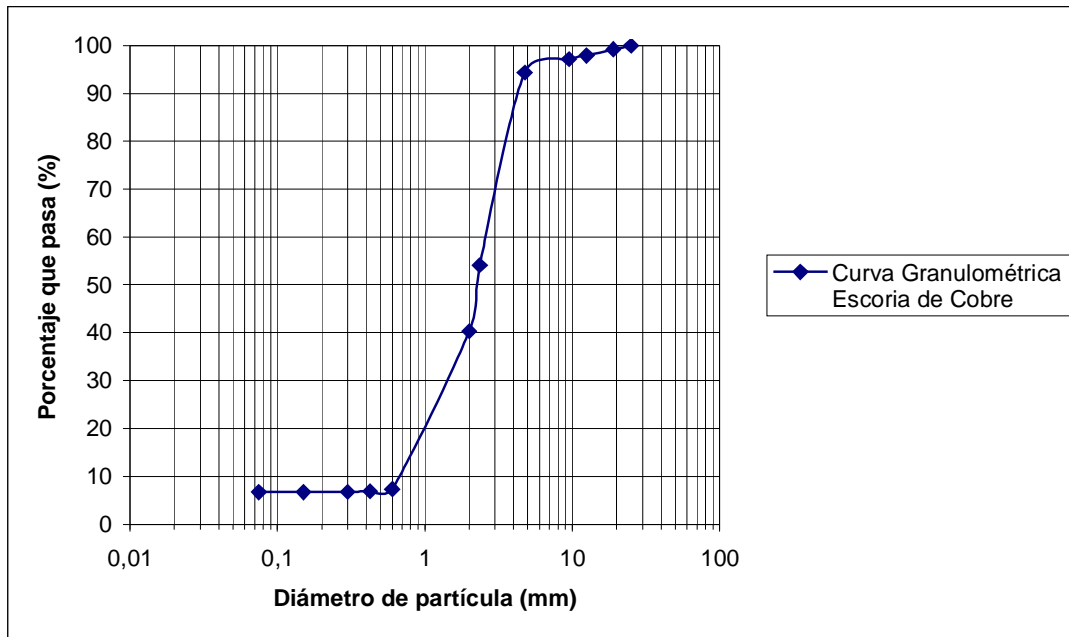
4.1. Escoria de cobre.

A partir de una partida representativa de escoria de cobre granallada proveniente de la fundición Caletones, perteneciente a la división El Teniente de CODELCO, se procedió a molerla de una manera reproducible controlando el tiempo necesario para obtener una finura compatible con la del cemento Portland a utilizar en el estudio (finura de Blaine de 4.400 (cm²/g)). Una vez determinado lo anterior, se procedió a realizar ensayos para verificar la composición química y mineralógica de la escoria a utilizar.

La escoria granallada utilizada, sacada previo a la molienda posee una granulometría que se muestra en tabla VII y gráfico I.

Tabla VII. Granulometría Escoria de Cobre antes de molienda.

Tamiz	% que pasa
1" (25,000mm)	100,00
¾" (19,000mm)	99,22
½" (12,500mm)	97,91
3/8" (9,500mm)	97,23
4 (4,750mm)	94,32
8 (2,360mm)	54,07
10 (2,000mm)	40,34
30 (0,600mm)	7,35
40 (0,425mm)	6,87
50 (0,300mm)	6,77
100 (0,150mm)	6,72
200 (0,075mm)	6,67

Gráfico I. Granulometría Escoria de Cobre antes de molienda.

4.1.1. Molienda.

La escoria de cobre se molió con objetivo de aumentar su reactividad con el cemento Portland durante la hidratación de la mezcla cemento / escoria.

Con el fin de lograr una molienda reproducible y homogénea, se tamizó de manera previa el material a moler, utilizando para esto la malla N° 4, excluyendo así las partículas de mayor diámetro, con el fin de utilizar las partículas con mayor contenido vítreo.

Posteriormente se procedió a moler esta escoria, en un molino de bolas (ubicado en la Planta Piloto Cerrillos de IDIEM) con capacidad máxima de 5 kg de material, en cantidades de a 3 kg durante tiempos de molienda de: 3 horas (finura 1) y 4 horas (finura 2) respectivamente.

Para ambos tiempos de molienda se busca que las respectivas finuras sean tales que la cantidad porcentual retenida en el tamiz 325 (0,044 mm) sea inferior al 15%, lo

cual estaría cerca de lo que especifica la norma NCh 161 Of69 – Puzolana para el uso en cementos – Especificaciones, la que exige una cantidad menor o igual a 12% retenida en el tamiz 325 solamente para la determinación de la actividad de la puzolana. De esta manera, obteniendo una finura así se podría presumir que será posible apreciar de buena manera las propiedades puzolánicas de la escoria de cobre.

El molino utilizado cuenta con la siguiente carga de bolas.

Tabla VIII. Carga de bolas del molino.

Diámetro (mm)	Peso (g)	Cantidad
2,8	80	5
3,6	180	20
3,8	220	25
4,8	480	22
5,3	560	5
5,8	820	7
7,8	2000	8
10,0	4000	2

Una vez concluida la molienda de la totalidad del material, para ambas finuras, se procedió a homogeneizarlo de manera mecánica.

Para cada uno de los tiempos de molienda bajo las condiciones descritas anteriormente, se obtuvo las siguientes finuras dadas por la superficie específica de Blaine y los porcentajes de escoria retenida en el tamiz 325.

Tabla IX. Superficie específica escoria y material retenido por tamiz 325.

Finuras	Retenido Tamiz 325 (%)	Superficie específica (Blaine) (cm²/g)
Finura 1 (3 horas de molienda)	14,35	4298
Finura 2 (4 horas de molienda)	12,85	4307

4.1.2. Caracterización química.

Para la determinación de la composición química de la escoria de cobre se realizó un análisis de Fluorescencia de Rayos X a una muestra de escoria.

Este ensayo de Fluorescencia de Rayos X fue realizado por el Laboratorio de Rayos X del departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Santiago de Chile, y sus resultados se muestran en la tabla X.

Tabla X. Resultados Análisis por Fluorescencia de Rayos X.

Elemento	Concentración (%)	Óxido	Concentración (%)
Fe	46,70	Fe ₂ O ₃	66,76
O	35,95	---	---
Si	10,64	SiO ₂	22,76
Al	1,82	Al ₂ O ₃	3,44
Cu	1,15	CuO	1,43
Ca	0,88	CaO	1,23
Na	0,62	Na ₂ O	0,83
K	0,57	K ₂ O	0,68
Mg	0,46	MgO	0,76
Ti	0,31	TiO ₂	0,52
S	0,24	SO ₃	0,61
Mo	0,24	MoO ₃	0,36
Zn	0,23	ZnO	0,29
Cr	0,06	CrO ₃	0,11
Pb	0,04	PbO ₂	0,04
P	0,03	P ₂ O ₅	0,06
Mn	0,03	MnO ₂	0,04
Sb	0,03	Sb ₂ O ₅	0,04
Ba	0,02	BaO	0,03
Zr	0,01	ZrO ₂	0,01
Sr	0,009	SrO	0,01

De la misma manera, se realizó a la escoria de cobre un análisis químico según la norma NCh 147 Of69 con el fin de detectar algún componente en exceso, ya sea de SO_3 ó de MgO , el cual al ser agregado en cierta proporción al cemento Portland podría tener consecuencias nocivas en sus propiedades.

Los resultados del análisis químico según norma NCh 147 Of69: Contenido de trióxido de azufre (SO_3); Contenido de óxido de magnesio (MgO)) realizado a las muestras de escoria de cobre, se muestran en la tabla XI.

Tabla XI. Análisis químico escoria de cobre.

Ensayo	Resultado (%)
Contenido SO_3	0,05
Contenido MgO	0,83

4.1.3. Caracterización mineralógica.

La caracterización mineralógica se obtiene mediante un análisis de Difracción de Rayos X, el cual fue realizado por el Laboratorio de Cristalografía del Departamento de Física de la Universidad de Chile.

Especificaciones de la medida y tratamiento de datos:

- Instrumento: Difractómetro SIEMENS D5000, para muestras policristalinas.
- Longitud de onda utilizada: $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$, correspondiente a un ánodo de Cu.
- Potencia utilizada: 40 KV / 30 mA.
- Rango de medida: $2^\circ - 80^\circ$ en 2θ .
- Paso: $0,02^\circ$ por segundo.
- Software para análisis de datos: Diffract plus.

Los máximos de difracción más importantes se pueden observar en la Tabla 1 del Anexo 1, donde también se encuentran el difractograma obtenido, 2θ vs CPS (cuentas por segundo) en la Figura 1 – Anexo 1, y el difractograma una vez realizada la identificación mediante la base de datos en la Figura 2 – Anexo 1.

En este análisis se han encontrado las siguientes coincidencias entre la base de datos y el difractograma obtenido:

Nombre	Fórmula
Iron Magnesium Oxide	Fe_2MgO_4
Olivine	$\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)$

4.2. Caracterización Cemento Portland.

El cemento Portland utilizado en el presente estudio corresponde a un cemento grado alta resistencia que cumple con la Norma Chilena NCh 148 Of.68. Por sus características puede ser asimilado al tipo I ASTM, grado 42,5 R de la Norma de la Unión Europea de cementos EN – 197, como HE según ASTM C – 1157. La marca comercial de este cemento es Melón Súper y sus características principales se muestran a continuación.

Tabla XII. Valores característicos del cemento Portland (Melón Super).

Fraguado inicial	95	(minutos)
Fraguado final	150	(minutos)
Superficie específica (Blaine)	4.400	(cm^2/g)
Densidad real	3,0	(g/cm^3)

Tabla XIII. Análisis químico cemento Melón Super.

Ensayo	Resultado (%)
Pérdida por calcinación	1,8
Residuo insoluble	0,8
Contenido SO ₃	2,9
Contenido MgO	1,1

La elección de este cemento se debió principalmente a que el cemento Melón Super es un Portland sin adiciones, con lo cual se podrá apreciar de mejor manera las propiedades puzolánicas de la escoria de cobre.

4.2. Arena Normal . (Ref 21)

Arena silíceo dividida en tres fracciones: fina, media y gruesa. Cada saco de arena de 1500 g (500 g fina, 500g media, 500g gruesa) es dosificado y envasado en la Planta Piloto de Cerrillos de IDIEM.

Los requisitos generales que debe cumplir la arena normal se definen en la norma NCh 163. Of79 - "Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales". En ésta se señala que los áridos deben estar constituidos por partículas duras, de forma y tamaño estables y, en general, libres de impurezas que afecten la resistencia y durabilidad de morteros y hormigones, para lo cual se especifican límites para diversos factores.

4.3. Agua.

El agua utilizada en los ensayos es agua potable.

4.4. Aditivo.

El aditivo utilizado para la fabricación del mortero de cemento con un 40% de reemplazo de escoria es un aditivo reductor de agua de alto rango que debe ser agregado en el agua de amasado, en una dosis recomendada por el fabricante de 1,2% con respecto al peso de cemento. El nombre comercial de este reductor de agua es Aqua Infinitud de marca Ulmen.

Capítulo 5.

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

5.1. Pasta de cemento.

Según la norma NCh 151. Of68, se tiene para las muestras: Patrón, P25 y P40, las siguientes cantidades de agua (Tabla XIV) como porcentaje en peso del cemento seco (cemento + escoria), con aproximación de 0,1, para lograr consistencia normal de la pasta.

Y de la misma manera, según la norma NCh 152. Of71, se tiene para las muestras: patrón, P25 y P40, los siguientes tiempos de fraguado inicial y final.

Tabla XIV. Propiedades del cemento fresco.

Serie	Adición escoria (%)	Porcentaje de agua (%)	Tiempo de fraguado	
			Inicial (min)	Final (min)
Patrón	0	28,6	150	200
P25	25	26,4	220	300
P40	40	24,6	230	330

Gráfico II. Consistencia Normal.

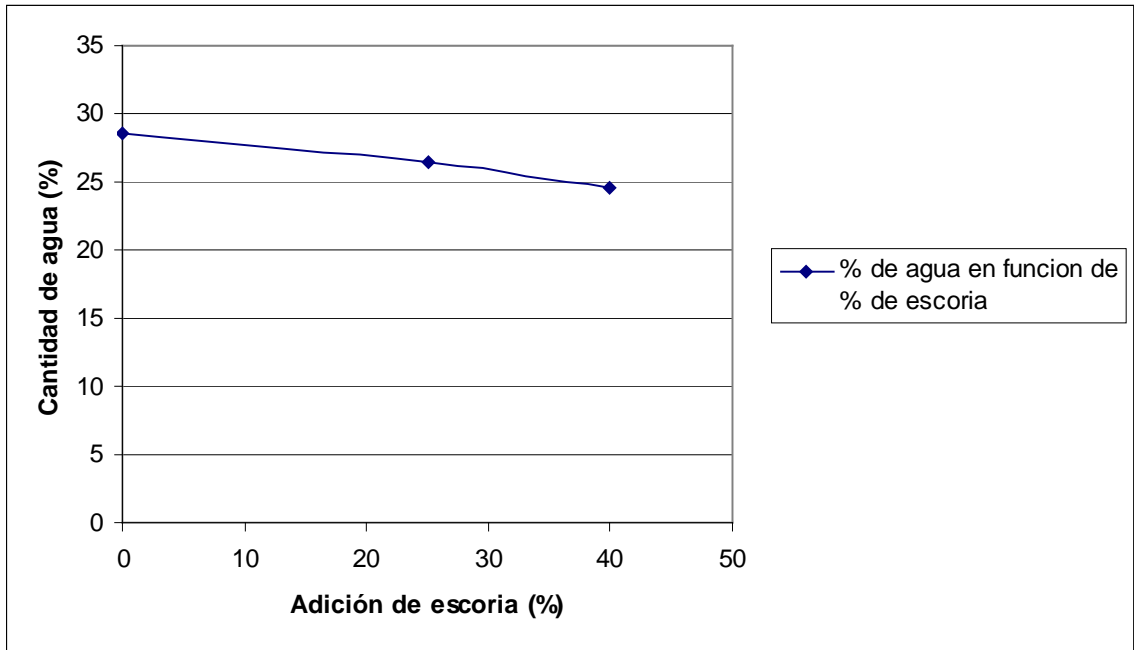
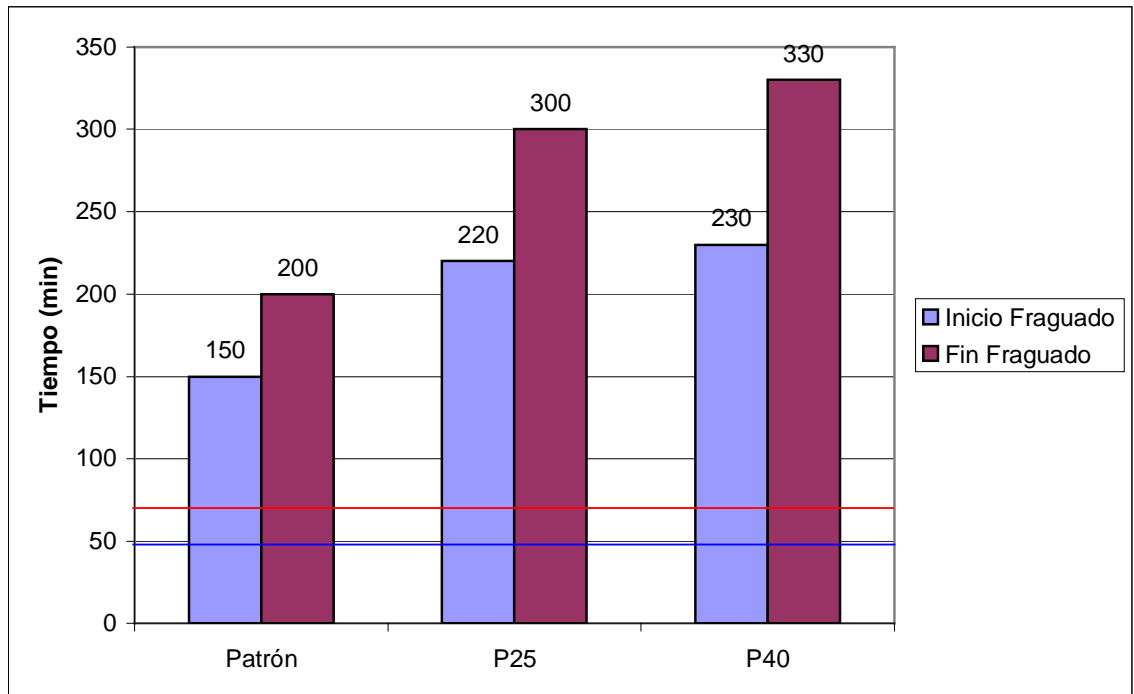


Gráfico III. Tiempos de Fraguado.



En el gráfico anterior las rectas de color rojo representan los tiempos mínimos de inicio de fraguado para cemento de grado alta resistencia (45 minutos) y corriente (60 minutos) dados por la norma NCh 152. Of71.

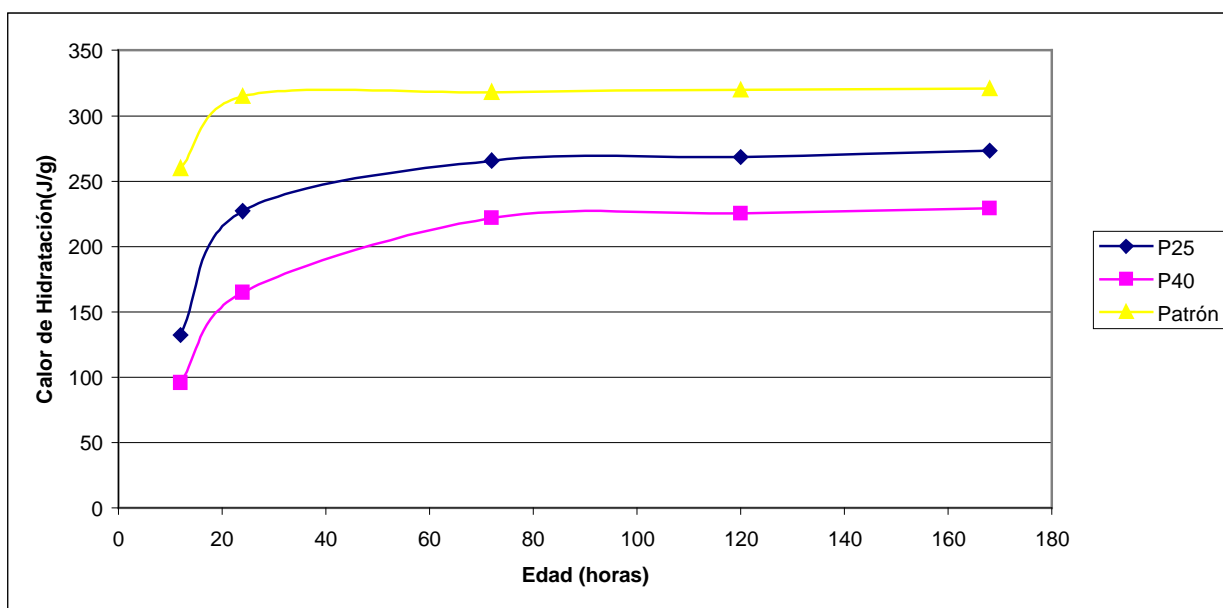
5.2. Calor de hidratación.

Según la norma ASTM C 186 – Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement, se tiene para las muestras: patrón, P25 y P40, los siguientes valores para el calor de hidratación de las muestras a las respectivas edades, Tabla XV.

Tabla XV. Calor de hidratación.

Edad (horas)	Calor de Hidratación		
	Patrón (J/g)	P25 (J/g)	P40 (J/g)
12	260,0	132,2	95,8
24	315,0	227,0	164,8
72	318,0	265,6	221,8
120	320,0	268,4	225,5
168	321,0	273,2	229,5

Gráfico IV. Calor de Hidratación



5.4. Resistencias Mecánicas.

Se efectuaron ensayos de resistencia a flexotracción y compresión, según la norma chilena NCh 158. Of67, en probetas curadas en la cámara húmeda a las series: Patrón, P25, P40 a edades de 7, 28 y 60 días, obteniéndose los resultados que a continuación se presentan, Tabla XVI.

Tabla XVI. Resistencia a Flexotracción y Compresión a 7, 28 y 60 días.

Serie	Adición escoria (%)	Resistencia (Flexión, Compresión) (kgf/cm ²)					
		7 días		28 días		60 días	
Patrón	0	76,0	493,5	86,0	643,0	85,5	680,5
P25	25	56,5	328,0	68,5	457,0	72,5	534,5
P40	40	41,0	190,0	53,0	310,5	65,5	388,5
P40A	40	51,0	421,0	64,0	565,0	66,0	636,0

Gráfico V. Desarrollo de resistencia a flexotracción en función del tiempo.

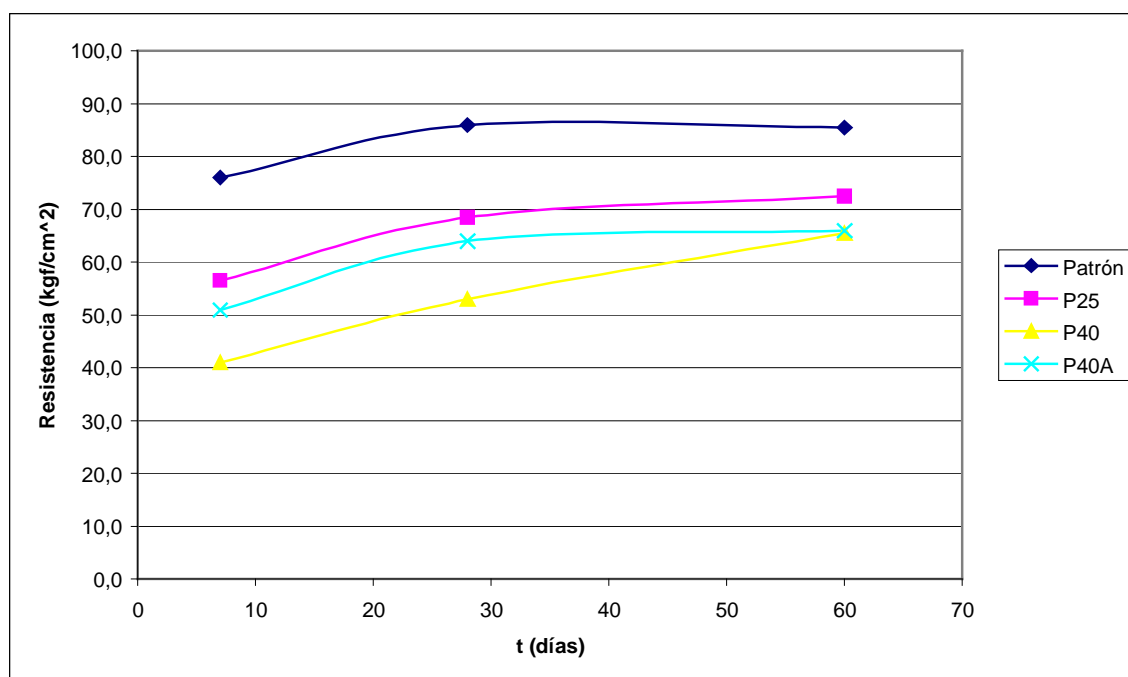


Gráfico VI. Desarrollo de resistencia a flexotracción en función del tiempo.

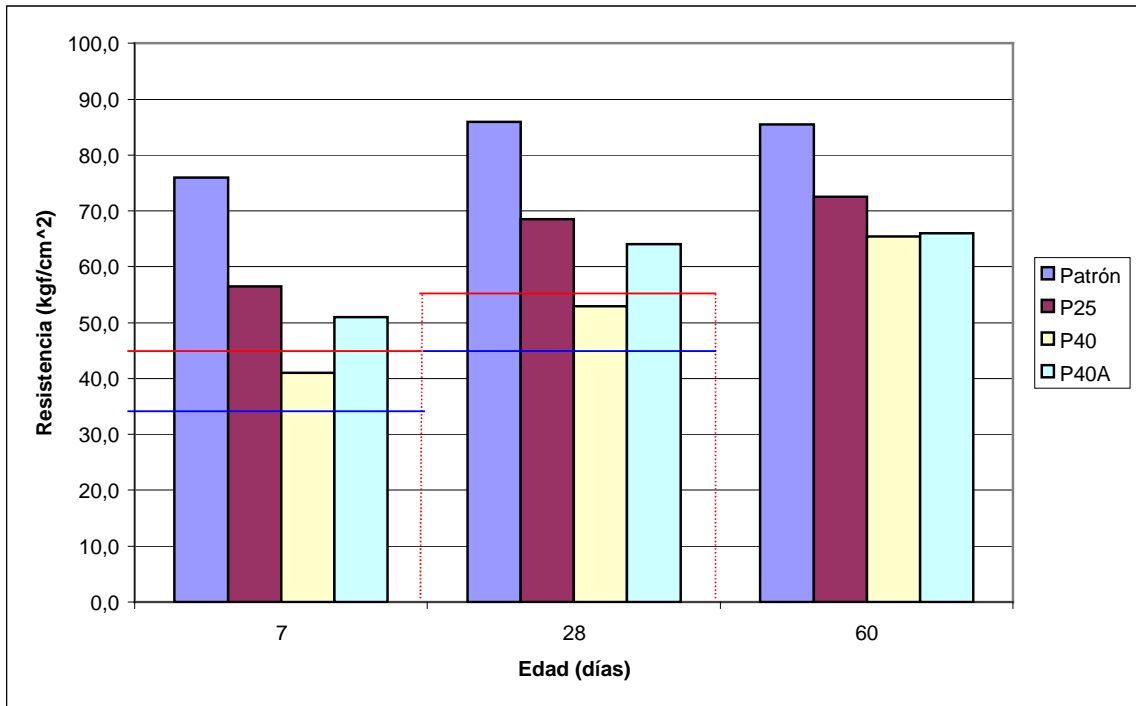


Gráfico VII. Desarrollo de resistencia a compresión en función del tiempo.

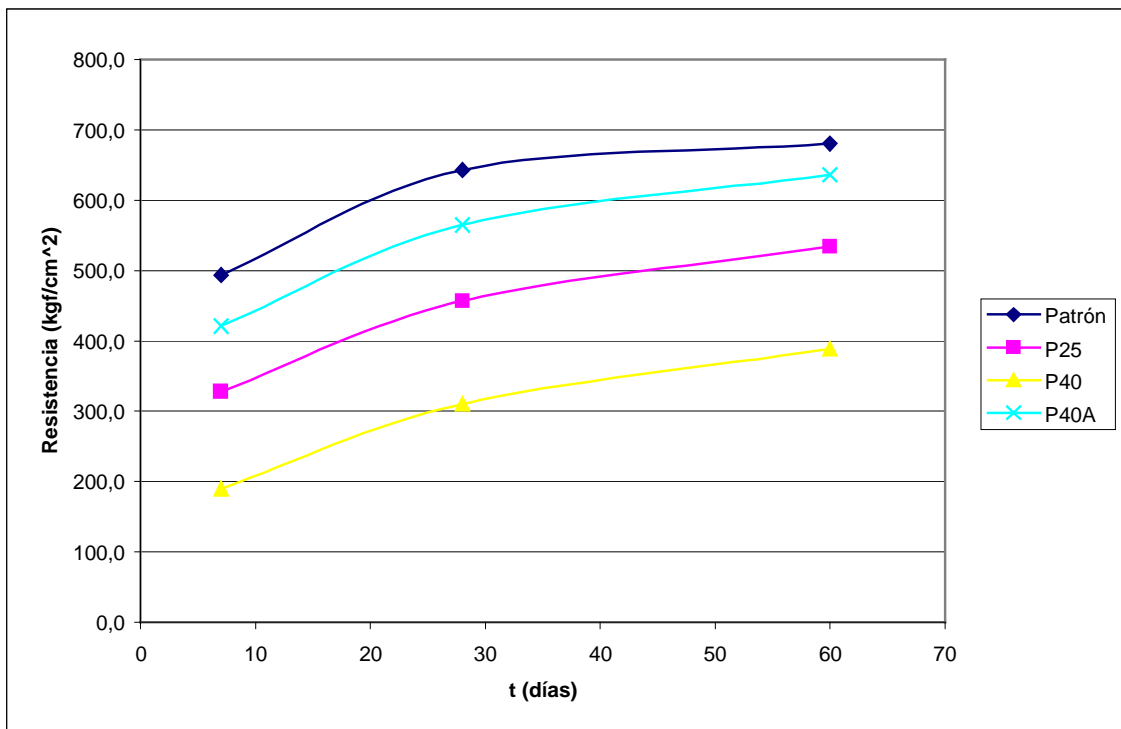
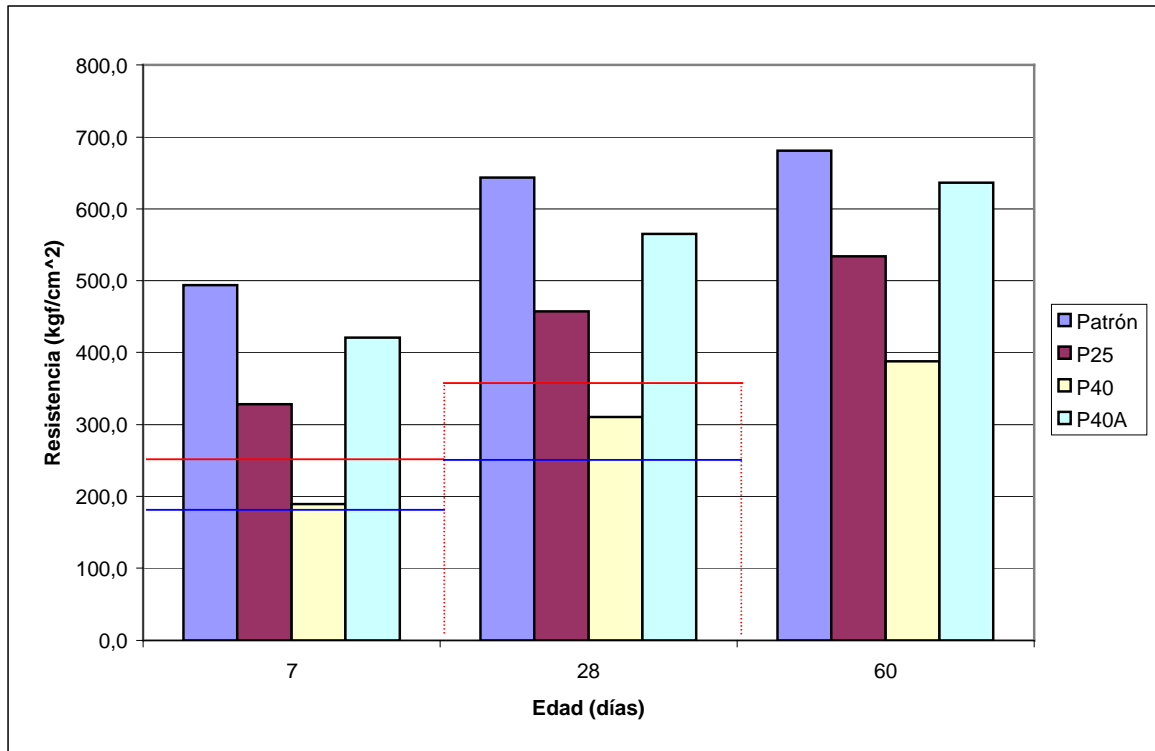


Gráfico VIII. Desarrollo de resistencia a compresión en función del tiempo.



En los gráficos VI y VIII las rectas de color rojo representan las resistencias mínimas para cemento de grado alta resistencia , y las de color azul representan las resistencias mínimas para cementos de grado corriente dados por la norma NCh 158. Of67.

5.5. Resistencia al ataque de Sulfatos.

Según la norma ASTM C1012 - Standard Test Method for Length Change of Hydraulic – Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, se tiene para las muestras: patrón y P40, las siguientes medidas de expansión (Tabla XVII) dada por el ataque de Sulfatos, durante 8 semanas.

Tabla XVII. Valores expansión por sulfatos.

Semana	Expansión (%)	
	Patrón	P40
1	0,00328	0,00262
2	0,00525	0,01575
3	0,00722	0,01312
4	0,01575	0,02756
5	0,01706	0,04724
6	0,01969	0,06562
7	0,01969	0,08793
8	0,02165	0,10761

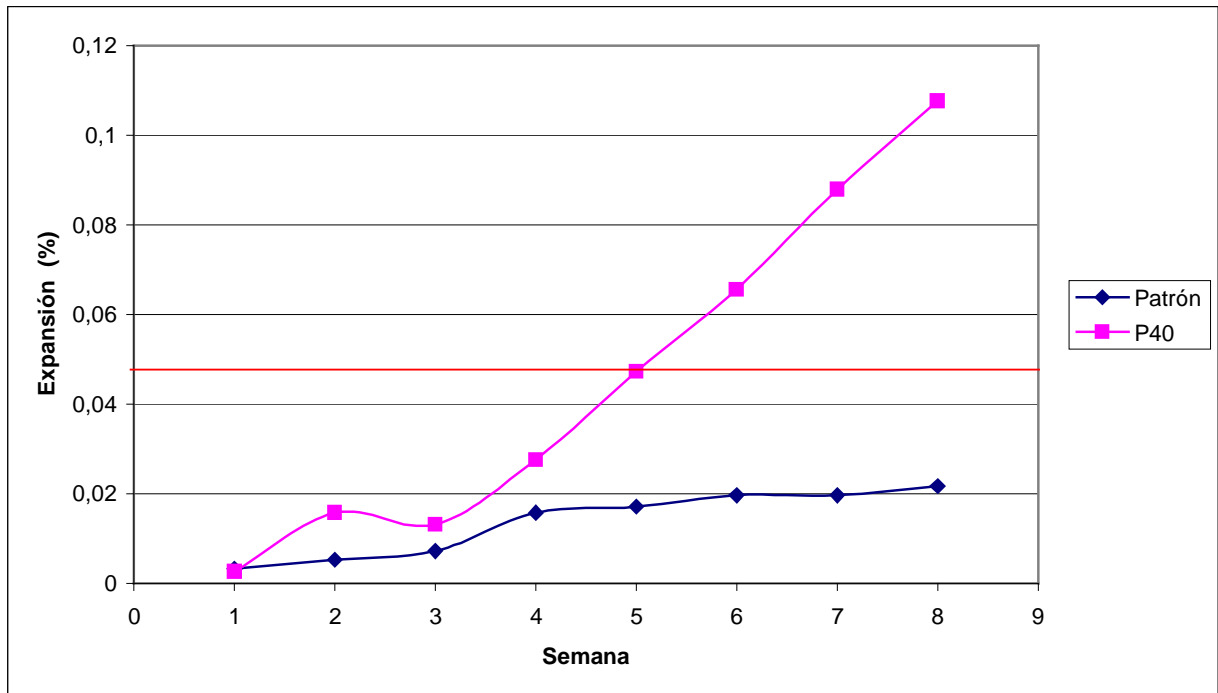
Estas medidas corresponden a los valores promedio de la deformación de 6 probetas en el caso del Patrón y de 3 probetas en el caso de la serie P40, esto se debió a que para la última se rompieron las restantes al desmoldarlas dada la poca resistencia que había alcanzado la mezcla al final del curado.

Las probetas que se lograron desmoldar exitosamente se dejaron en la cámara húmeda hasta que alcanzaran la resistencia requerida por la norma, cosa que sucedió con dos semanas de diferencia entre el Patrón y P40.

Una vez alcanzada la resistencia requerida, se procedió a sumergir las probetas en la solución sulfatada, y se dejó aparte dos probetas de cada serie, las que se

sumergieron en agua, para poder desagregar la expansión total en expansión hidráulica y expansión neta dada por los sulfatos.

Gráfico IX. Expansión por sulfatos.



En el gráfico anterior la recta de color rojo representa el límite de expansión debido a la acción de sulfatos dado por la norma ASTM C1012 - 04.

5.6. Expansión en Autoclave.

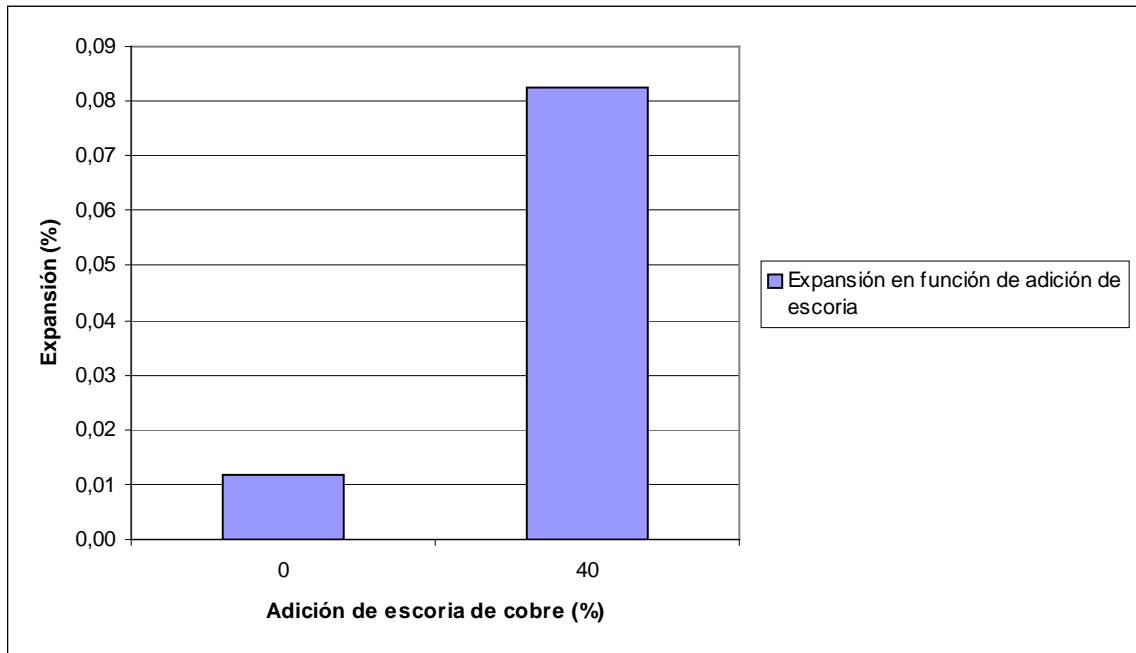
Este es un ensayo acelerado que pretende representar a corto plazo lo que pueda suceder con el mortero en la práctica después de varios meses o años. Consiste básicamente en la determinación de la expansión o contracción sufrida por la pasta de cemento sometida a una conservación en atmósfera saturada por vapor de agua. Este cambio de longitud se debe principalmente a la presencia de óxido de magnesio en el cemento experimental.

Según la norma NCh 157. Of67, se tiene para las muestras: patrón y P40, las siguientes medidas de expansión dada por el autoclave, Tabla XVIII.

Tabla XVIII. Expansión en autoclave.

Serie	Expansión (%)
Patrón	0,01
P40	0,08

Gráfico X. Expansión en autoclave.



Estas medidas corresponden al promedio de expansión en autoclave de 2 probetas por cada serie.

5.7. Lixiviación.

El test de lixiviación (TCLP) inorgánico a las probetas ya ensayadas a resistencia mecánica correspondientes a la serie P40 se hizo mediante el método USEPA 1311, el cual fue realizado por el Centro Nacional de Medio Ambiente (CENMA), Laboratorio de química y Referencia medio ambiental. Este test permite detectar la presencia de los siguientes elementos químicos en los lixiviados de las probetas previamente molidas: Arsénico (As), Bario (Ba), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Plomo (Pb), Selenio (Se), Plata (Ag) y Mercurio (Hg).

Las edades de las probetas a la hora del análisis fue de aproximadamente 4 meses.

Los resultados obtenidos para la Determinación de la característica de toxicidad por lixiviación (TCLP), Método USEPA 1311, SW846; Determinación de metales pesados por ICP-OES, Método USEPA 6010B, SW-846; Determinación de Hg por espectropia de absorción atómica con vapor frío, Método USEPA 7470 A, SW-846, son los siguientes.

Tabla XIX. Resultados lixiviación.

Muestra	Concentración (mg/L)							
	Arsénico	Bario	Cadmio	Cromo	Plomo	Selenio	Plata	Mercurio
P40	0,014	1,02	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	$6,16 \cdot 10^{-3}$
Nivel Regulatorio	5,0	100,0	1,0	5,0	5,0	1,0	5,0	0,2
Límite de Detección	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$7,70 \cdot 10^{-4}$	$5,43 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$2,12 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$
Límite de Cuantificación	$9,3 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,57 \cdot 10^{-3}$	$1,81 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$7,07 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$

Donde <LD significa menor que el Límite de detección.

Capítulo 6.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

6.1. Caracterización de la escoria de Cobre.

Los valores obtenidos para la concentración de cada elemento químico componente de la escoria de cobre y los obtenidos por la bibliografía desde la misma fuente, es decir la fundición de Caletones, muestran que el producto utilizado en el estudio es un material de características prácticamente homogéneas en el tiempo, lo que es producto del control que se requiere del proceso de producción y refinación del cobre.

Con respecto al análisis químico de la escoria de cobre según la norma NCh 147. Of69, se tiene que el contenido de SO_3 para ambas dosificaciones, 25% y 40% de escoria, cumple con la cota máxima dada por la norma.

La molienda de la escoria de cobre presentó gran dificultad desde el punto de vista técnico al no contar con un molino de mayor energía para intentar alcanzar una superficie específica mayor a la lograda. La finura de la escoria de cobre varió entre 4.298 (cm^2/g) y 4307 (cm^2/g), a pesar que la diferencia de tiempo de molienda entre una y otra fue de una hora, lo que demuestra que la escoria de cobre presenta una gran dureza por lo que se requiere un alto nivel de energía para lograr un consecuente nivel de finura.

6.2. Pasta de cemento: agua de consistencia normal.

De los resultados obtenidos para el ensayo de la determinación de la cantidad de agua para pastas de consistencia normal se puede apreciar como era de esperar, una disminución del porcentaje de agua necesario para lograr consistencia normal a medida

que se aumenta el porcentaje de escoria de cobre adicionado a la mezcla. En cementos con un 25 % de adición de escoria de cobre la cantidad de agua disminuye en un 2,2% con respecto a la correspondiente para el cemento patrón, mientras para el cemento con 40% de adición la cantidad de agua para lograr consistencia normal disminuye en un 4% con respecto al patrón (0% de adición de escoria de cobre).

Esta disminución del agua necesaria para alcanzar la consistencia normal se debe principalmente a la disminución del cemento presente en la pasta, ya que la escoria no debería presentar requerimientos de agua.

6.3. Determinación del tiempo de fraguado.

De los resultados obtenidos para el ensayo de determinación del tiempo de fraguado se puede apreciar que tanto el tiempo de fraguado inicial como el final aumenta al aumentar la adición de escoria de cobre en la mezcla. Para la dosificación P25 se aprecia un aumento del 47% del tiempo de fraguado inicial y un aumento del 50% del tiempo de fraguado final, mientras que para la dosificación P40 se tuvo un aumento del 53% para el tiempo de fraguado inicial y del 65% para el tiempo de fraguado final.

Por otro lado, se puede apreciar que para todas las dosificaciones se cumple el tiempo de fraguado inicial mínimo y el tiempo de fraguado final máximo impuesto por la norma NCh 152. Of68, tanto para cementos de grado corriente como para los de alta resistencia.

De esta manera se puede desprender que la escoria de cobre actúa en alguna manera como retardador de fraguado del cemento.

6.4. Calor de hidratación.

De los resultados obtenidos para el ensayo de la determinación del calor de hidratación, se puede apreciar para las distintas dosificaciones que la evolución del calor de hidratación en el tiempo son muy similares en forma, aumentando de manera muy pronunciada en las primeras horas y amortiguándose esta curva con el tiempo.

De la misma manera se puede apreciar que al aumentar el contenido de escoria en la mezcla cementicia, el calor de hidratación emitido por la misma disminuye de manera considerable, confirmando lo esperable, que la escoria de cobre es un material de mucha menor reactividad que el cemento Portland.

Lo anterior es posible apreciarlo de mejor manera con un análisis porcentual, el que muestra en que medida el calor de hidratación emitido por el cemento Portland va disminuyendo al ir reemplazando este último por escoria de cobre, análisis que se muestra a continuación en la tabla XX.

Tabla XX. Calor de hidratación porcentual.

Edad (horas)	Calor de Hidratación		
	Patrón (%)	P25 (%)	P40 (%)
12	100,0	50,8	36,9
24	100,0	72,1	52,3
72	100,0	83,5	69,8
120	100,0	83,9	70,5
168	100,0	85,1	71,5

6.5. Resistencia a la flexotracción y a la compresión.

Los resultados de los ensayos de resistencia mecánica realizados a las distintas dosificaciones se pueden apreciar de mejor manera para su análisis como porcentaje de la resistencia del mortero Patrón como se muestra a continuación.

Tabla XXI. Resistencia Flexotracción porcentual.

Serie	7 días (%)	28 días (%)	60 días (%)
Patrón	100,00	100,00	100,00
P25	74,34	79,63	84,80
P40	53,95	61,63	76,61
P40A	67,11	74,42	77,19

Tabla XXII. Resistencia Compresión porcentual.

Serie	7 días (%)	28 días (%)	60 días (%)
Patrón	100,00	100,00	100,00
P25	66,46	71,07	78,55
P40	38,50	48,29	57,09
P40A	85,31	87,87	93,46

La reducción de resistencia mecánica asociada a la incorporación de escoria de cobre al cemento Portland se aprecia algo mas importante en flexotracción que en compresión, disminución que no es lineal con el porcentaje de adición.

Los resultados oscilan entre un 76,61% y un 84,80% de la resistencia del cemento Patrón para la flexotracción y entre un 57,09% y 78,55 % para la compresión, lo que indicaría un aporte de resistencia dado por la escoria de cobre, sobre todo en la dosificación P25.

Las resistencias logradas por el mortero P25 a 7 y 28 días cumplen con los requerimientos de resistencia mínima a la compresión y a la flexión, tanto como para cementos de grado corriente como de alta resistencia, dados por la norma NCh 148 Of68. De la misma manera el mortero P40 cumple con los requerimientos de resistencia mínima a la compresión y a la flexión sólo para los cementos de grado corriente.

Se puede apreciar que la adición del reductor de agua a la dosificación P40 aumentó considerablemente sus resistencias, sobre todo la resistencia a la compresión, obteniendo las más altas de todas las dosificaciones, reduciendo de manera significativa la diferencia con el cemento Portland.

6.6. Resistencia al ataque de Sulfatos. (Norma ASTM C1012 - 04)

De los resultados obtenidos para el ensayo de cambios de longitud de morteros de cementos hidráulicos expuestos a una solución de sulfatos, se puede apreciar que la expansión total de la dosificación P40 alcanza a ser aproximadamente cinco veces la expansión presentada por el cemento Portland, alcanzando un 0,021% el cemento Portland y un 0,1% el P40. Esto mostraría que el cemento experimental P40 no es resistente al ataque de sulfatos, ya que supera el límite de deformación dado por la norma ASTM C1012 de 0,048%.

La expansión total se desagregó en expansión hidráulica y expansión neta por la exposición a la solución sulfatada, como se aprecia gráficamente a continuación.

Gráfico XI. Hinchamiento por inmersión en agua.

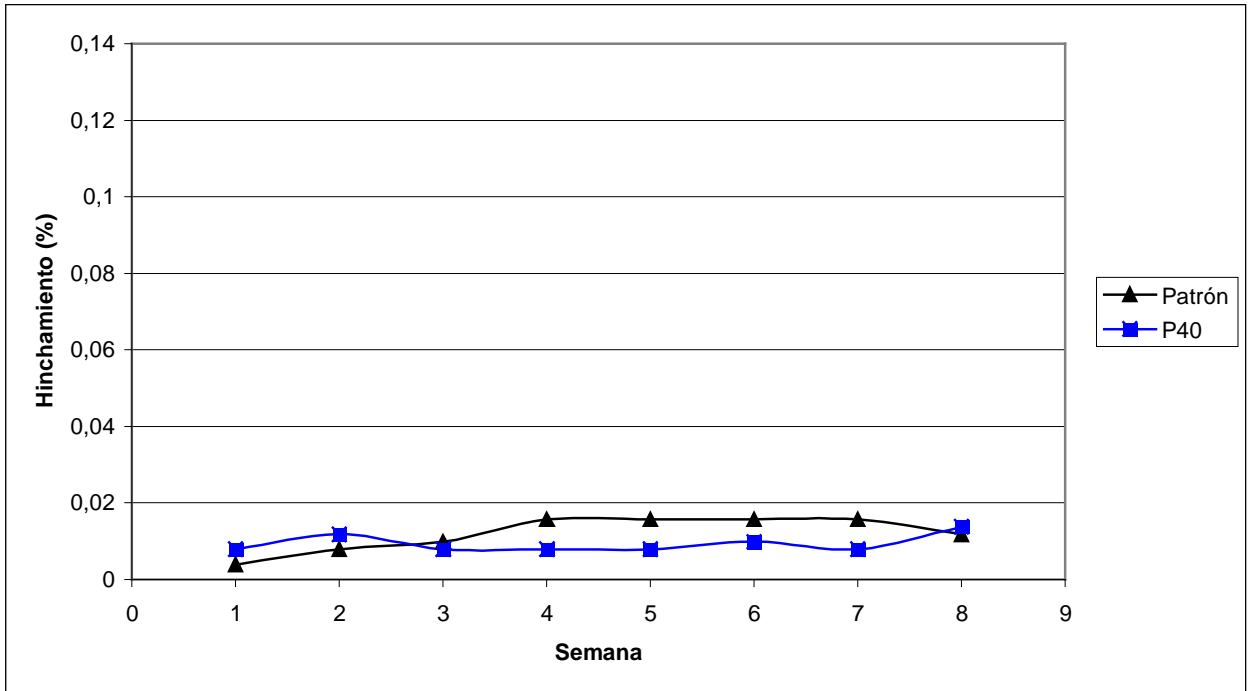
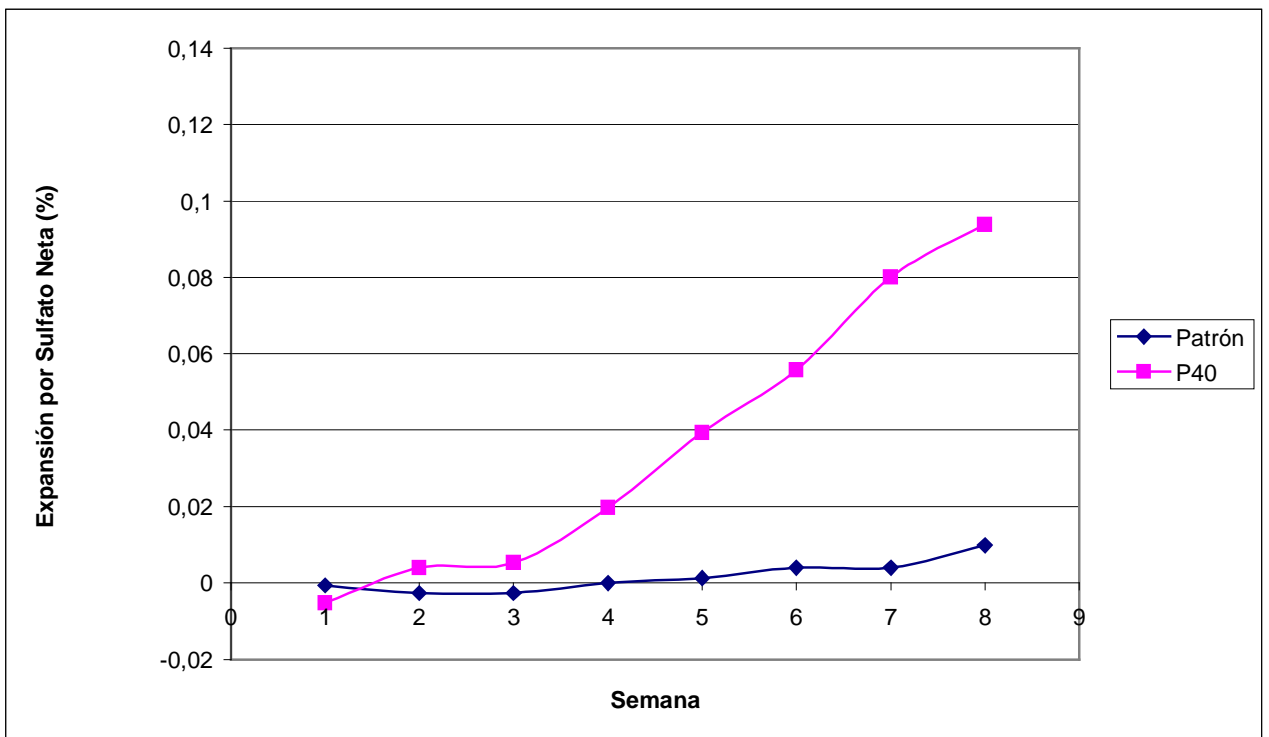


Gráfico XII. Expansión por sulfatos neta.



Como se puede apreciar, el hinchamiento por inmersión hidráulica es mayor para el cemento Patrón que para la adición de escoria P40, tendencia que se revierte en las últimas semanas. Al contrario, la expansión neta dada por la acción de la solución sulfatada es mucho mayor para la probeta P40 que para la del cemento Patrón.

Cabe notar que las oscilaciones que presenta la expansión hidráulica son de magnitudes mínimas, las cuales son menores a la dispersión asociada al operador.

De manera inspectiva, se pudo apreciar que las probetas de la dosificación P40 inmersas en la solución sulfatada presentaron un mayor deterioro externo que sus probetas compañeras inmersas en agua, al igual que con las probetas del cemento Patrón inmersas en la solución sulfatada.

6.7. Expansión en Autoclave.

Los resultados obtenidos para el ensayo de la expansión en autoclave muestran que la dosificación P40 presenta una expansión mayor que el cemento patrón, de aproximadamente ocho veces la primera, pero aún así esta expansión no es considerable, ya que la dispersión de los resultados asociada al operador es de un 0,1%, la cual es incluso mayor que la expansión alcanzada por la dosificación P40, la que fue de 0,08%.

La expansión en autoclave obtenida para la probeta con escoria de cobre cumple ampliamente los requerimientos de la norma, la cual exige como máximo una expansión del 1%.

6.8. Lixiviación.

Los resultados del test de lixiviación muestran que para la dosificación P40, el líquido lixiviado contiene elementos tóxicos cuantificables entre sus componentes, los cuales son: Arsénico, Bario y Mercurio.

Las concentraciones de estos elementos son mínimas con respecto a el nivel regulatorio (los que se pueden apreciar en la presentación de resultados), 0,28% en el caso del arsénico, 1% en el caso del bario y 3% en el caso del mercurio.

Capítulo 7.

CONCLUSIONES.

La preocupación por la generación de residuos en procesos industriales y mineros viene generando, en forma creciente, una tendencia mundial a buscar y estudiar nuevas formas de utilización ó aprovechamiento de estos residuos. En esta búsqueda, se estudia la utilización de la escoria de cobre generada en el proceso pirometalúrgico de refinamiento del cobre llevado a cabo en la fundición Caletones de la división El Teniente de CODELCO, utilizándola como adición en la fabricación de cementos hidráulicos.

En el presente estudio se fabricaron tres cementos experimentales, los que se diferenciaban entre sí por la cantidad de escoria de cobre agregada en reemplazo de cemento Portland, los cuales fueron los siguientes: cemento Portland con 25% de su peso reemplazado por escoria de cobre, cemento Portland con 40% de su peso reemplazado por escoria de cobre y el último idéntico al anterior, pero con aditivo reductor de agua. A estos cementos se les realizó una serie de ensayos estandar con el fin de estudiar los efectos de las adiciones de escoria de cobre en las propiedades de morteros en estado fresco y endurecido, estudiar las propiedades puzolánicas de la escoria de cobre y la capacidad de retención de elementos químicos contaminantes en el mortero a mediano y largo plazo.

En base a los respectivos ensayos estándar se pudo apreciar en general que las propiedades de morteros en estado fresco desarrolladas por los cementos con adición de escoria de cobre, cumplen con los requisitos mínimos de tiempo de fraguado establecidos en la normativa nacional para los cementos en ambas graduaciones, alta resistencia y corriente. Por otro lado, al comparar el tiempo de fraguado respecto al cemento Portland sin adición, la escoria se comporta como un retardante de fraguado.

Por otro lado, las resistencias mecánicas desarrolladas por los cementos fabricados en el presente estudio, superan los requisitos mínimos establecidos por la normativa chilena para los cementos nacionales de grado corriente y de alta resistencia en el caso del cemento con un reemplazo de 25 % de escoria de cobre, y los requisitos mínimos establecidos por la norma para los cementos de grado corriente en el caso del cemento con un reemplazo de 40% de escoria de cobre. De la misma manera se pudo establecer que la resistencia mecánica de los morteros con adición de escoria de cobre disminuye al aumentar el porcentaje de adición. Pero esta resistencia se ve drásticamente aumentada al agregar al cemento experimental un aditivo reductor de agua, abriendo una interesante puerta a la utilización de la escoria de cobre. Cabe notar que el desarrollo de resistencia por aporte de la escoria de cobre es un proceso lento, pudiéndose notar de mejor manera en los resultados a una edad de 60 días.

En cuanto a la emisión de calor de hidratación de las mezclas, se estableció que disminuye de manera importante en la medida que aumenta el porcentaje de adición de escoria de cobre, propiedad no menos importante, ya que esto abriría una posibilidad de uso de la escoria de cobre como adición al cemento en obras que utilizan cementos en grandes masas, las cuales tienen como problema importante el control de la temperatura del hormigón en elementos masivos por la gran cantidad de calor de hidratación del cemento, para evitar eventual agrietamiento.

En contraposición a lo anterior se puede apreciar una desventaja en el hecho que los cementos con adición de escoria de cobre sometidos al ensayo estándar, según se pudo apreciar en los resultados, no presentan buen comportamiento frente al ataque de sulfatos al incrementar las reacciones expansivas del mortero con cemento Portland, sobrepasando de manera importante el límite de deformación permitido por la normativa internacional.

Una ventaja no menor que deja al descubierto la presente investigación es que los morteros de cemento con adición de escoria de cobre presentan una buena capacidad de retención de elementos químicos contaminantes, ya que las concentraciones de estos que son lixiviados al ser sometidos a ensayo estándar son no cuantificables en su gran mayoría y muy pequeñas con respecto a los niveles

regulatorios en el caso del arsénico, bario y mercurio, lo que permite catalogar a los morteros con adición de escoria de cobre como un material no tóxico para el medio ambiente, no habiendo problemas para utilizarlo en las cercanías de ríos o algún otro tipo de flujo de agua.

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos desarrollados en el presente estudio, se puede concluir que es factible la utilización de la escoria de cobre como adición de cemento Portland. Esta factibilidad se puede ver optimizada, tanto técnica como económicamente, realizando ensayos de optimización de mezclas a escala de hormigones, los que deberían apuntar a: encontrar un nivel óptimo de molienda, en el cual se considere el gasto energético de alcanzar cierto grado de molienda y sus beneficios aglomerantes; estudiar los beneficios que tendría la incorporación de la escoria de cobre como adición directamente en la molienda del clínquer; dosificación de la cantidad de yeso en la mezcla cementicia, ya que la escoria por si sola actúa como retardador de fraguado; estudiar de manera más acabada la dosificación óptima en la cantidad de adición; estudiar la factibilidad de utilizar la escoria de cobre granallada como árido fino en la fabricación de morteros; entre otros.

Bibliografía.

- [1] ESCALANTE GARCÍA, JOSÉ I. “Materiales alternativos al cemento Portland”, Cinvestav, Unidad Saltillo, Abril 2002.
- [2] SANTANDER, NELSON H. “Pirometalurgia del cobre” pp. 27-28 Ed. UTE, Chile, 1979 2ª edición.
- [3] BISWAS, A. K.; DAVENPORT, W. G. “El Cobre: Metalurgia Extractiva” pp. 104-106, Ed. LIMUSA S.A., México.
- [4] ARIAS QUEZADA, ÁLVARO “Factibilidad Técnico-Económica de instalar una planta de granalla de escoria de cobre en la Fundición de Caletones” Memoria, Depto. de Ing. Industrial, Fac. de Cs. Físicas y Matemáticas, U. de Chile, Agosto, 1993.
- [5] ROPER H., KAM F. & AULD G. J. “Characterization of a Copper Slag Used in Mine Fill Operations” Fly Ash, Silica Fume, Slag & Other Mineral by Product in Concrete. ACI SP 79 Vol. II. pp. 1091-1109. USA 1983.
- [6] DOUGLAS, E.; MAINWARING, P.; HEMMING, R. T. “Pozzolanic Properties of Canadian Non-Ferrous Slags” ” Fly Ash, Silica Fume, Slag & Other Mineral by Product in Concrete. ACI SP 91 Vol. II. pp. 1525-1550. USA 1986.
- [7] DOUGLAS, E.; MAINWARING, P. “Hydratation and Pozzolanic Activity of Non-Ferrous Slags”. American Ceramic Bulletin, Vol 64, N° 5, pp. 706-706, 1985.
- [8] ENV 197-1 “Cemento. Composición, Especificaciones y Criterios de Conformidad. Cementos Comunes”. Comité Europeo de Normalización. 1992.

- [9] HWANG, C. L.; LAIW, J. C. "Properties of Concrete Using Copper Slag as Substitute for Fine Aggregate" Fly Ash, Silica Fume, Slag & Other Mineral by Product in Concrete. ACI SP 114 Vol. II. pp. 1677-1695. USA 1989.
- [10] ESPINOZA, RODRIGO A. "Estudio de factibilidad técnica de la utilización de escoria de cobre en la producción de materiales en base a cemento Pórtland" Memoria, Depto. de Ing. de los Materiales, Fac. de Cs. Físicas y Matemáticas, U. de Chile, Marzo 1999.
- [11] MALHOTRA, V. M. "Supplementary Cementing Materials for Concrete" CANMET. Minister of Supply and Services. Canadá. 1987.
- [12] MERRIT, FREDERICK S. "Manual del ingeniero civil"; Tomo I; Tercera edición; Editorial Mc. Graw Hill.
- [13] NCh 148 Of68. "Cemento. Terminología, Clasificación y Especificaciones Generales". 1968.
- [14] CZERNIN, WOLFGANG. "La Química del Cemento" Cap. III, IV y V. Ed. Palestra, Barcelona, 1993.
- [15] CEMENTOS BÍO BÍO "Cemento, Fabricación y Clasificación". Monografía Cementos Bío Bío S. A. C. I., 3ª ed., agosto 1996.
- [16] NCh 147. Of69 . "Cementos – Análisis Químico". 1969.
- [17] NCh 151. Of68. "Cemento – Método de determinación de la consistencia normal". 1968.
- [18] NCh 152. Of71. "Cemento – Método de determinación del tiempo de fraguado". 1971.
- [19] ASTM C 186-05. "Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement". 2005.

- [20] NCh 158. Of67. "Cementos – Ensayos de flexión y compresión de morteros de cemento". 1967.
- [21] NCh 163. Of79. "Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales". 1979.
- [22] ASTM C 1012 – Standard Test Method for Length Change of Hydraulic – Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution.
- [23] LASNIBAT, JUAN PABLO. "Influencia de adiciones puzolánicas en la resistencia al ataque de sulfatos en hormigones de cemento portland" Memoria, Depto. de Ing. Civil, Fac. de Cs. Físicas y Matemáticas, U. de Chile, 1990.

ANEXOS

ANEXO A.
#889 Escoria De Cobre

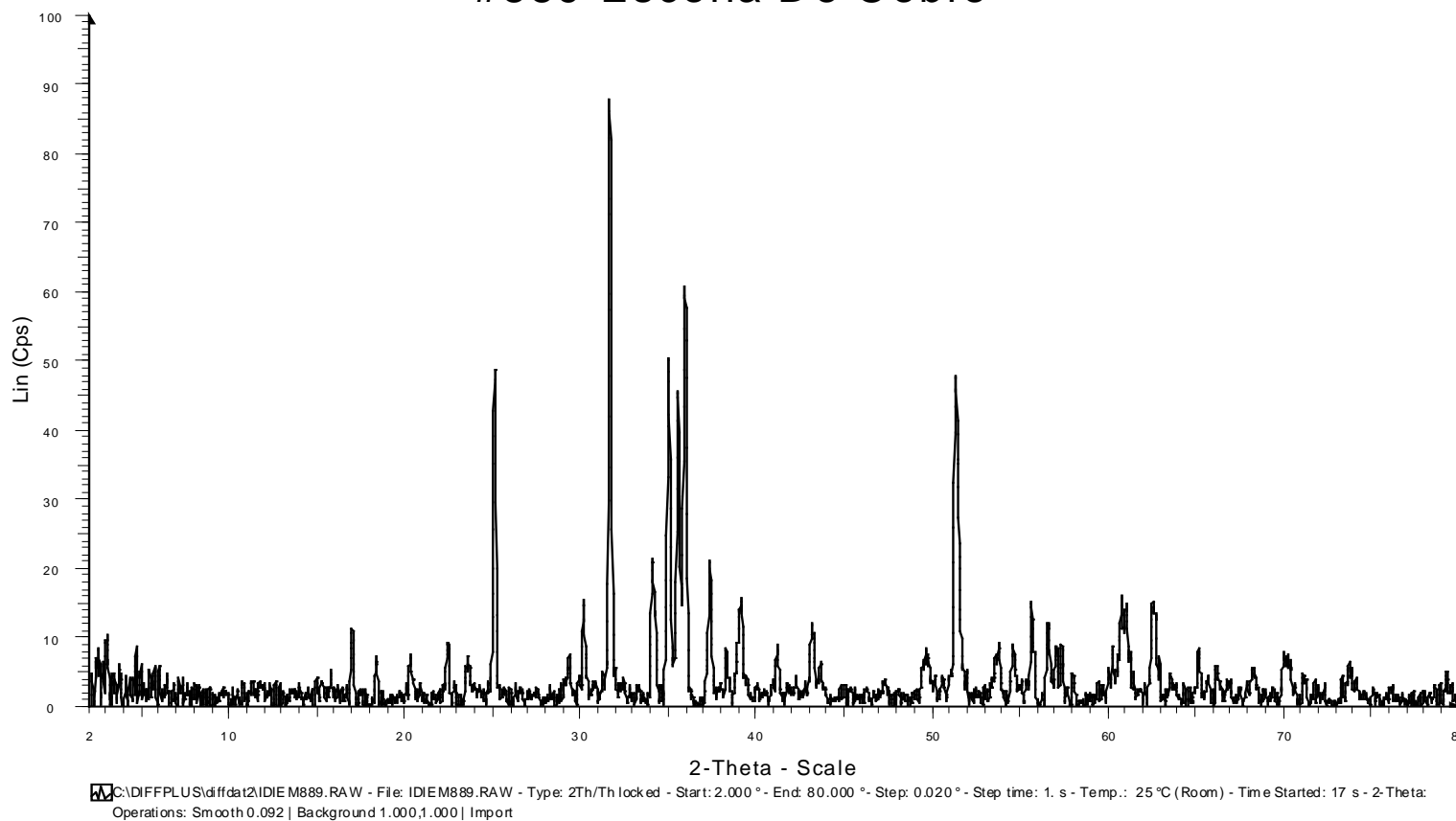


Figura 1. Difractograma obtenido, 2θ vs CPS (cuentas por segundo).

#889 Escoria De Cobre

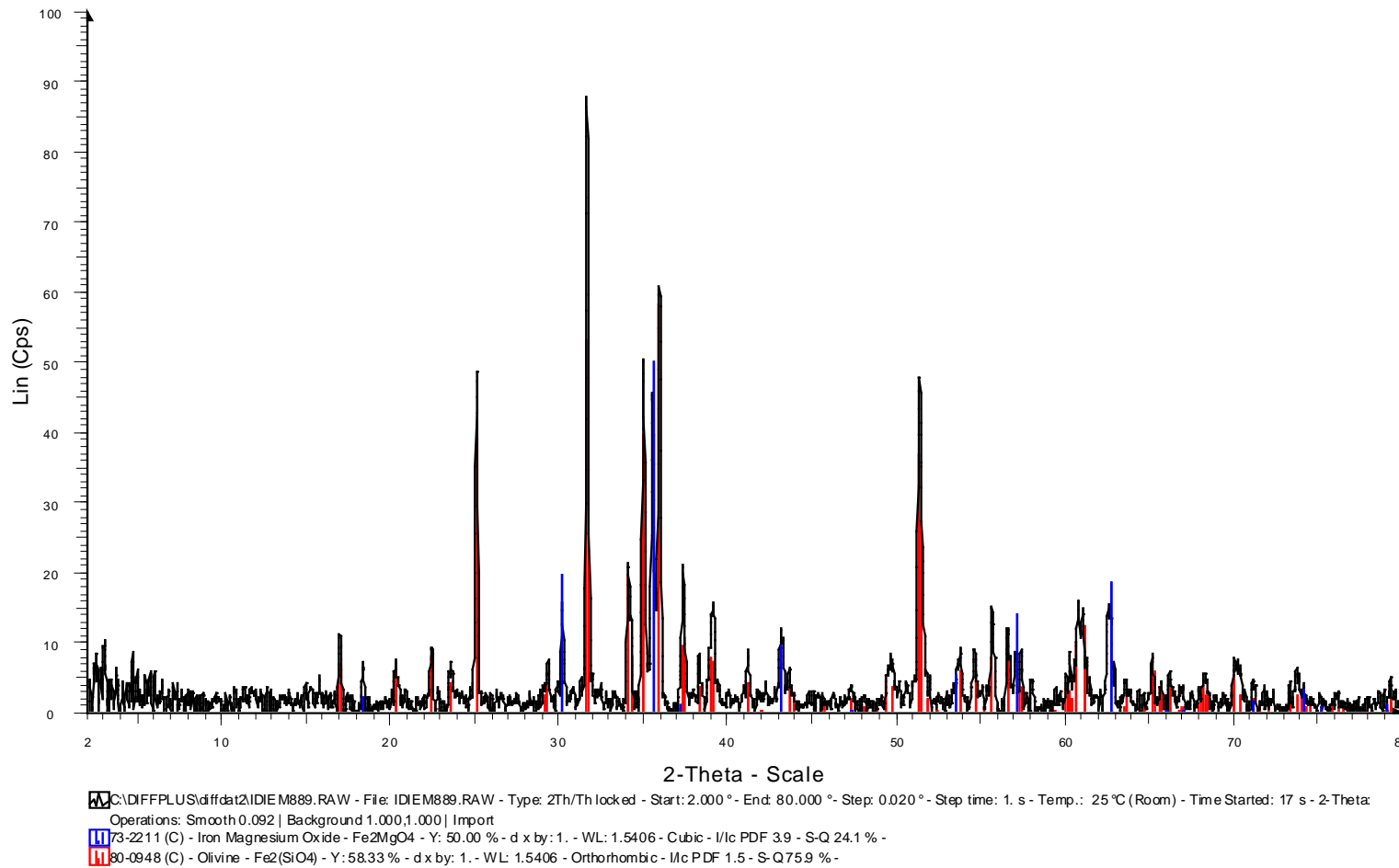


Figura 2. Difractograma una vez realizada la identificación mediante la base de datos.

Tabla I. Datos de mayor importancia dentro del Difractograma.

Ángulo	Distancia Interplanar	Intensidad	Intensidad
2-Theta °	Angstrom	Cps	%
16,94	5,231	11	13
18,31	4,842	7	8
20,26	4,380	7	8
22,39	3,968	9	10
23,55	3,774	7	8
25,06	3,550	49	55
29,40	3,036	7	8
30,17	2,960	15	18
31,65	2,825	88	100
34,10	2,628	21	24
34,99	2,562	50	57
35,54	2,524	45	52
35,95	2,496	61	69
37,35	2,406	21	24
38,32	2,347	8	10
39,11	2,301	16	18
41,21	2,189	9	10
43,19	2,093	12	14
49,71	1,832	8	9
51,41	1,776	48	54
53,84	1,701	9	10
54,67	1,677	9	10
55,72	1,648	15	17

Tabla I (continuación). Datos de mayor importancia dentro del Difractograma.

Ángulo	Distancia Interplanar	Intensidad	Intensidad
2-Theta °	Angstrom	Cps	%
56,67	1,623	12	14
57,42	1,607	9	10
58,11	1,586	4	5
62,68	1,481	15	17
65,27	1,428	8	9
68,33	1,372	5	6

ANEXO B.**DATOS EXPERIMENTALES Y MEMORIA DE CÁLCULOS.**

Determinación de la consistencia normal y tiempos de fraguado.

Tabla I.

Serie	Cantidad agua (ml)	t1	t2	t3
Patrón	143	11 30	14 00	14 50
P25	132	11 40	15 20	16 40
P40	123	11 50	15 40	17 20

Tabla II.

Serie	Cantidad Agua (ml)	% de agua	Inicio fraguado (min)	Fin fraguado (min)
Patrón	143	28,6	150	200
P25	132	26,4	220	300
P40	123	24,6	230	330

Resistencias mecánicas.**Tabla III.**

	7 días		28 días		60 días	
	flexión	compresión	flexión	compresión	flexión	compresión
	(kgf/cm ²)		(kgf/cm ²)		(kgf/cm ²)	
Patrón	76,0	492,0	85,0	641,0	87,0	681,0
	76,0	495,0	87,0	645,0	84,0	680,0
	76,0	493,5	86,0	643,0	85,5	680,5
P25	59,0	336,0	68,0	471,0	71,0	514,0
	54,0	320,0	69,0	443,0	74,0	555,0
	56,5	328,0	68,5	457,0	72,5	534,5
P40	47,0	233,0	58,0	365,0	66,0	389,0
	35,0	147,0	48,0	256,0	65,0	388,0
	41,0	190,0	53,0	310,5	65,5	388,5
P40A	51,0	421,0				

Cada uno de los valores corresponde al promedio de tres probetas ensayadas, como lo indica la norma chilena NCh 158. Of67.

Expansión por sulfatos.**Tabla IV. Cemento Patrón, primeras 4 semanas.**

		Lectura				
		semana 0 17-04-06	semana 1 24-04-06	semana 2 01-05-06	semana 3 08-05-06	semana 4 15-05-06
en agua	1	12,13	12,14	12,15	12,15	12,16
en agua	2	11,72	11,73	11,74	11,75	11,77
	3	11,9	11,9	11,91	11,91	11,93
	4	11,52	11,53	11,54	11,54	11,56
	5	12,46	12,47	12,47	12,48	12,5
	6	12,34	12,35	12,35	12,36	12,38
	7	12,11	12,12	12,13	12,13	12,15
	8	12,94	12,95	12,95	12,96	12,99
Cambios de longitud						
	1	0	0,01	0,02	0,02	0,03
	2	0	0,01	0,02	0,03	0,05
	3	0	0	0,01	0,01	0,03
	4	0	0,01	0,02	0,02	0,04
	5	0	0,01	0,01	0,02	0,04
	6	0	0,01	0,01	0,02	0,04
	7	0	0,01	0,02	0,02	0,04
	8	0	0,01	0,01	0,02	0,05
	Patrón	11,42	11,42	11,42	11,42	11,42
Expansion promedio %		0	0,00328	0,00524	0,00721	0,01574
Expansion por agua %		0	0,00394	0,00787	0,00984	0,01574
Expansion por sulfato neta %		0	-0,00065	-0,00262	-0,00262	0,00468

Tabla V. Cemento Patrón, semana quinta a octava.

		Lectura			
		semana 5 22-05-2006	semana 6 29-05-2006	semana 7 05-06-2006	semana 8 12-06-2006
en agua	1	12,16	12,16	12,16	12,16
en agua	2	11,77	11,77	11,77	11,75
	3	11,93	11,94	11,94	11,95
	4	11,57	11,57	11,57	11,58
	5	12,5	12,51	12,51	12,51
	6	12,39	12,40	12,40	12,40
	7	12,15	12,16	12,16	12,16
	8	12,99	12,99	12,99	13,00
Cambios de longitud					
	1	0,03	0,03	0,03	0,03
	2	0,05	0,05	0,05	0,03
	3	0,03	0,04	0,04	0,05
	4	0,05	0,05	0,05	0,06
	5	0,04	0,05	0,05	0,05
	6	0,05	0,06	0,06	0,06
	7	0,04	0,05	0,05	0,05
	8	0,05	0,05	0,05	0,06
	Patrón	11,42	11,42	11,42	11,42
Expansion promedio %		0,01706	0,01968	0,01968	0,02165
Expansion por agua %		0,01575	0,01575	0,01575	0,01181
Expansion por sulfato neta %		0,00131	0,00394	0,00394	0,00984

Tabla VI. Dosificación P40 primeras 4 semanas.

		Lectura				
		Probeta	semana 0 02-05-06	semana 1 09-05-06	semana 2 16-05-06	semana 3 23-05-06
en agua	1	12,75	12,78	12,78	12,78	12,78
en agua	2	13,3	13,31	13,33	13,33	13,33
	3	11,77	11,77	11,8	11,81	11,84
	5	12,51	12,52	12,55	12,55	12,59
	6	11,54	11,55	11,59	11,59	11,63
Cambios de longitud						
	1	0	0,03	0,03	0,02	0,02
	2	0	0,01	0,03	0,02	0,02
	3	0	0	0,03	0,03	0,06
	5	0	0,01	0,04	0,03	0,07
	6	0	0,01	0,05	0,04	0,08
	Patrón	11,42	11,42	11,42	11,41	11,41
Expansion promedio %		0	0,00262	0,01575	0,01312	0,02756
Expansion por agua %		0	0,00787	0,01181	0,00787	0,00787
Expansion por sulfato neta %		0	-0,00525	0,00394	0,00525	0,01969

Tabla VII. Dosificación P40, semana quinta a octava.

		Lectura			
Probeta		semana 5	semana 6	semana 7	semana 8
		06-06-06	13-06-06	20-06-06	27-06-06
en agua	1	12,78	12,78	12,77	12,79
en agua	2	13,33	13,32	13,32	13,33
	3	11,89	11,93	11,98	12,04
	4	12,64	12,67	12,73	12,78
	5	11,68	11,72	11,78	11,82
Cambios de longitud					
	1	0,02	0,03	0,02	0,04
	2	0,02	0,02	0,02	0,03
	3	0,11	0,16	0,21	0,27
	4	0,12	0,16	0,22	0,27
	5	0,13	0,18	0,24	0,28
	Patrón	11,41	11,41	11,41	11,42
Expansion promedio %		0,04724	0,06561	0,08792	0,10761
Expansion por agua %		0,00787	0,00984	0,00787	0,01377
Expansion por sulfato neta %		0,03937	0,05577	0,08005	0,09383

Expansión en autoclave.**Tabla VIII.**

	Li (mm)	Lf (mm)	Lpi (mm)	Lpf (mm)	delta (%)	Expansión (%)
Patrón	11,55	11,58	11,42	11,42	0,01181	0,01
	11,39	11,42	11,42	11,42	0,01181	
P40	11,40	11,62	11,42	11,42	0,08661	0,08
	11,65	11,85	11,42	11,42	0,07874	

ANEXO C.



Imagen 1: Escoria de cobre granallada molida.



Imagen 2: Cemento Patrón.

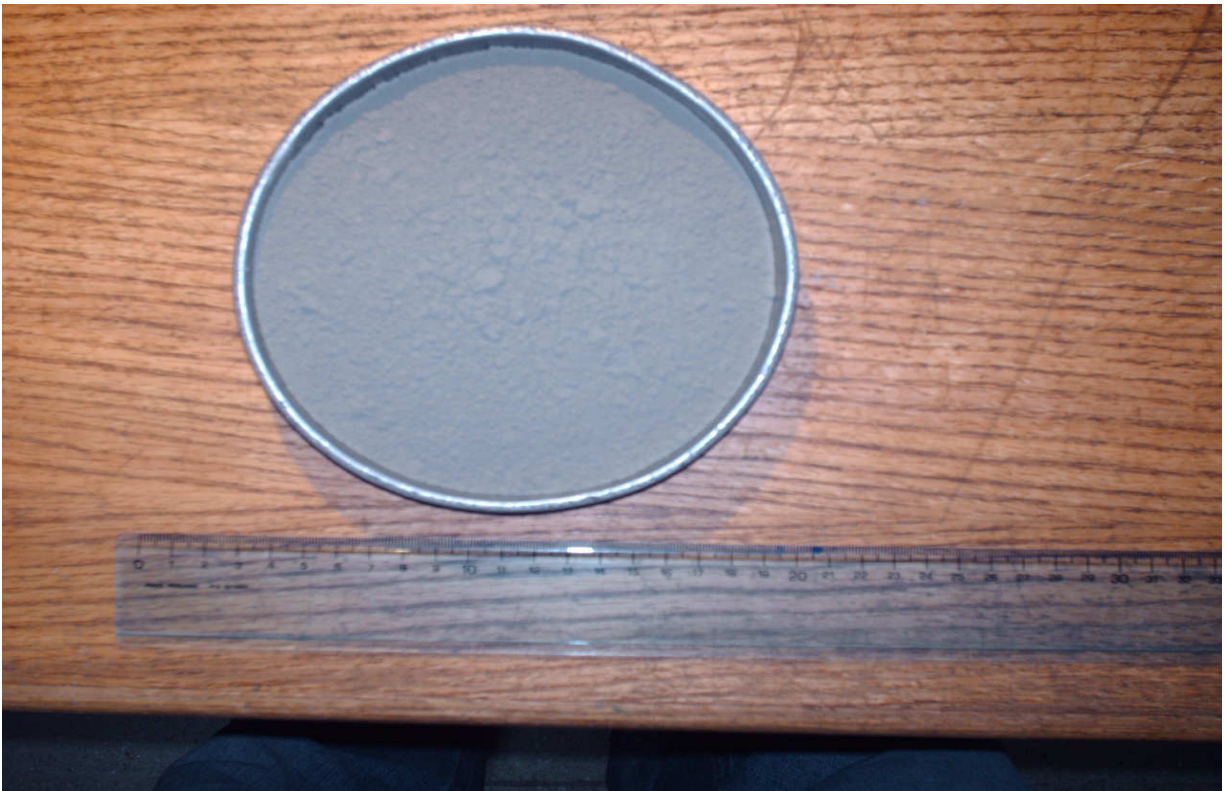


Imagen 3: Dosificación P25.



Imagen 4: Dosificación P40.



Imagen 5: Probetas ensayadas a resistencias mecánicas, Cemento Patrón.

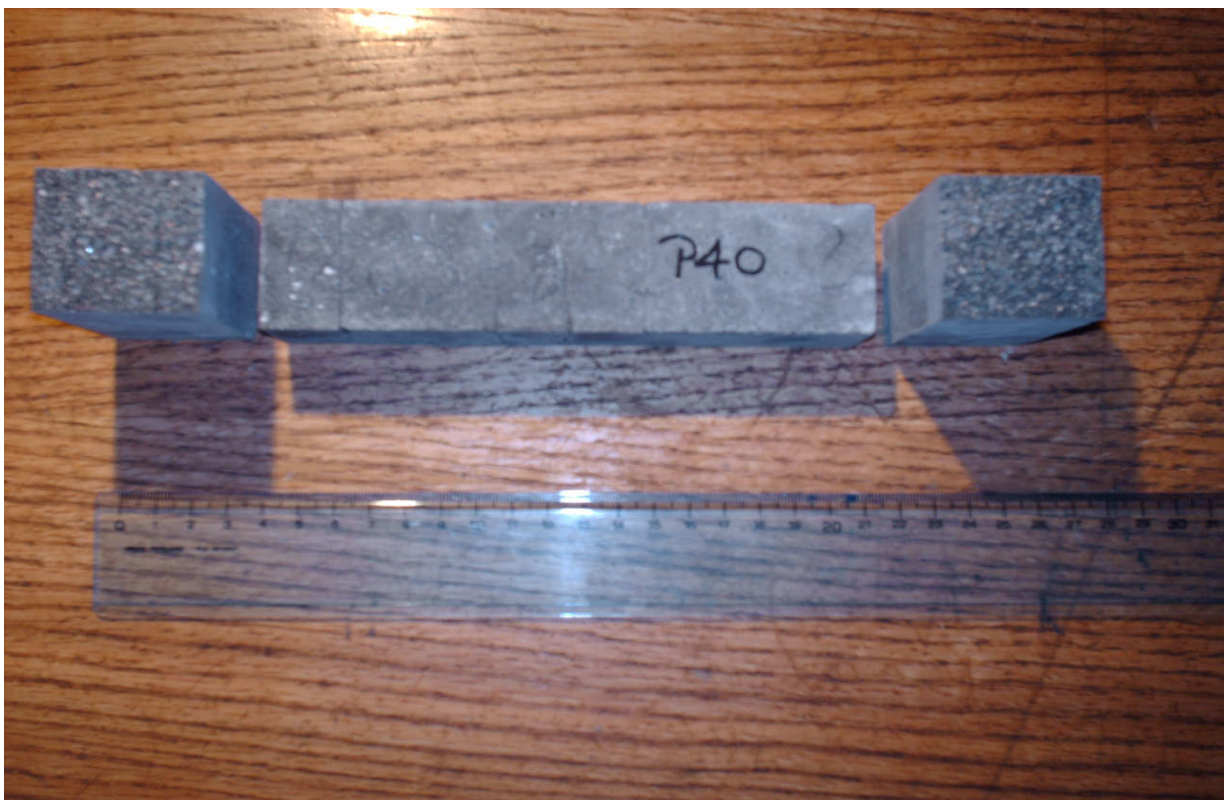


Imagen 6: Probetas ensayadas a resistencias mecánicas, Dosificación P40.

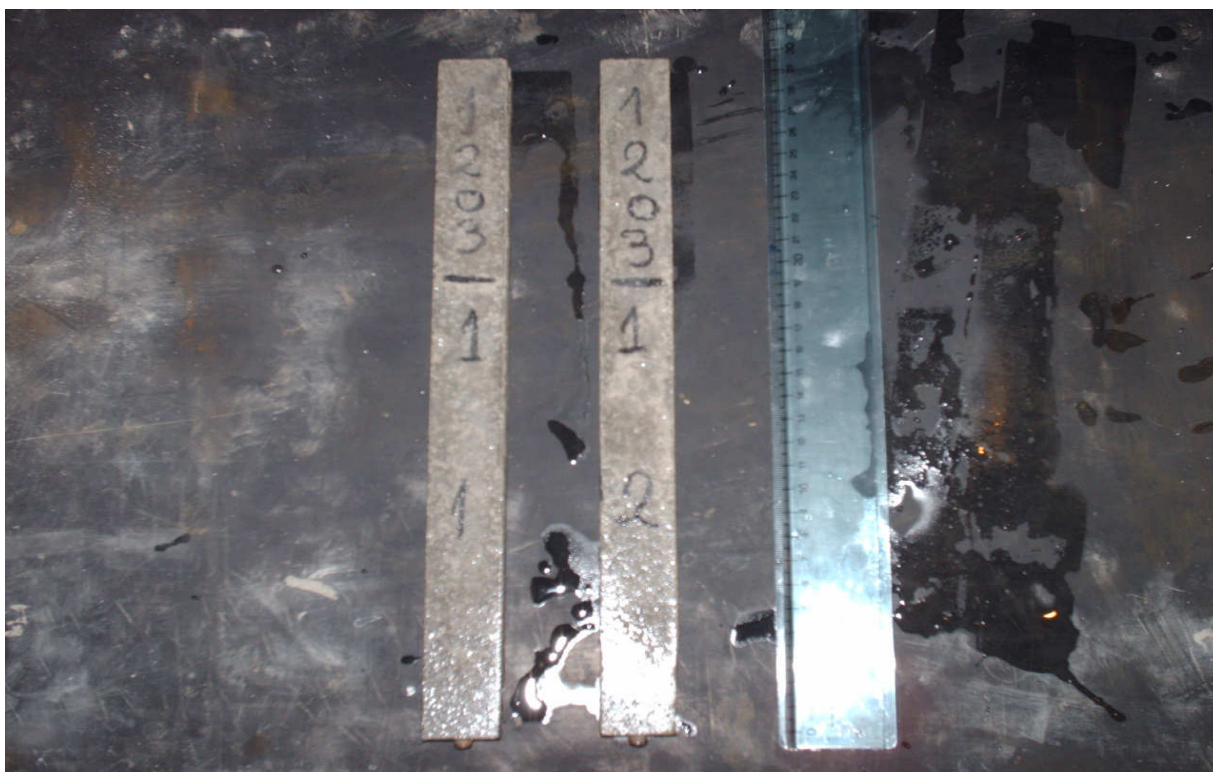


Imagen 7: Probetas cemento Patrón sumergidas en agua durante 8 semanas.



Imagen 8: Probetas dosificación P40 sumergidas en agua durante 8 semanas.

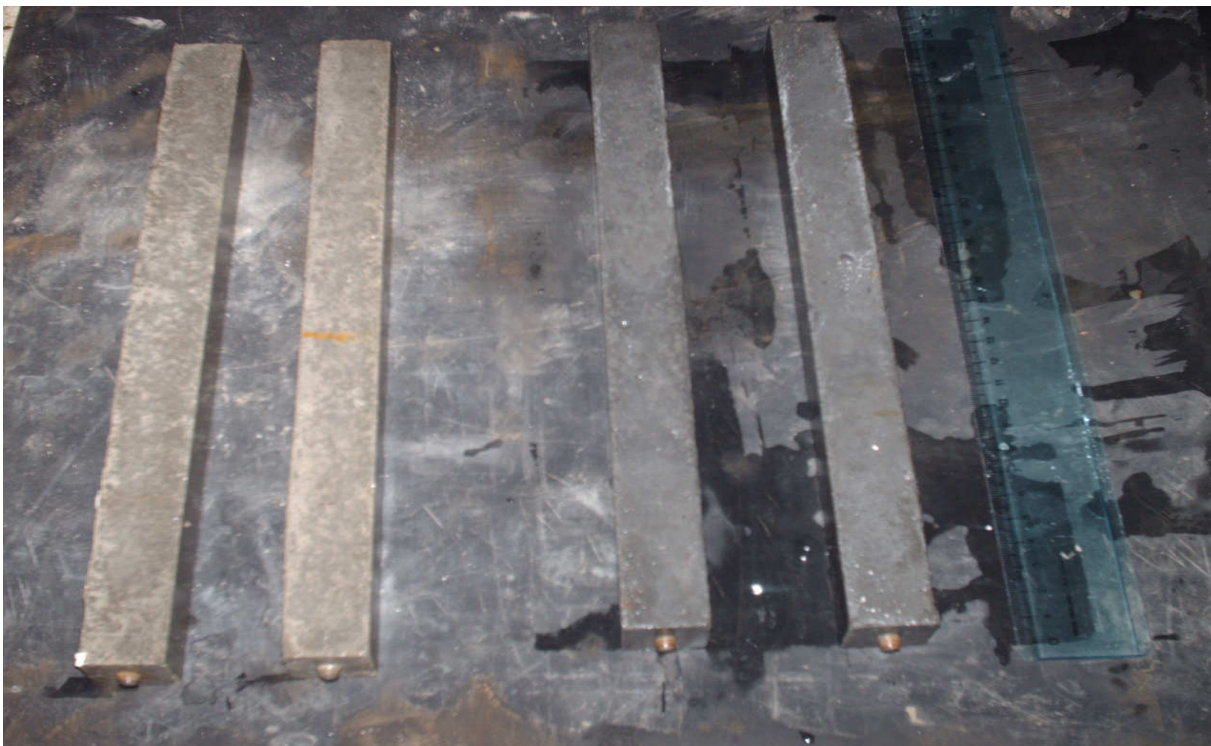


Imagen 9: Probetas sumergidas en agua durante 8 semanas.



Imagen 10: Probetas cemento Patrón sumergidas en solución sulfatada durante 8 semanas.

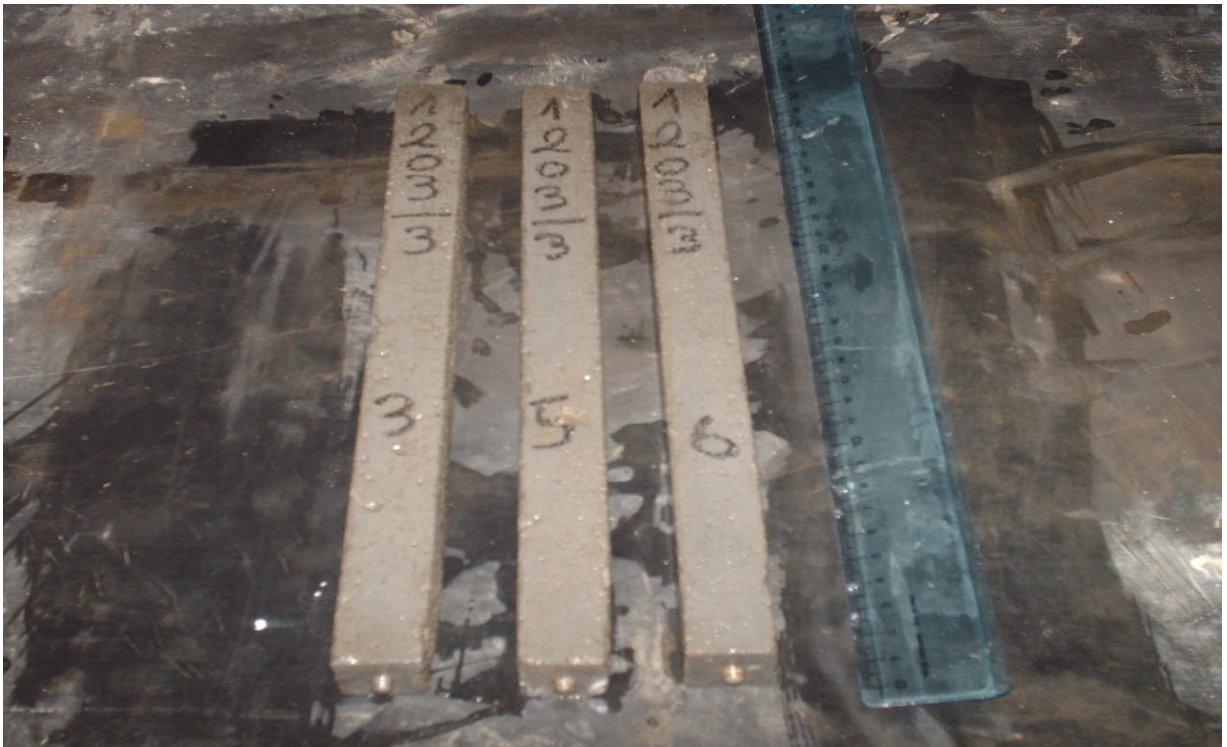


Imagen 11: Probetas dosificación P40 sumergidas en solución sulfatada durante 8 semanas.



Imagen 11: Acercamiento probetas dosificación P40 sumergidas en solución sulfatada durante 8 semanas.

